

ISSN (Print) 2306-3173

ISSN (Online) 2413-1601

№ 3(13), 2016

# АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОИЗВОДСТВА

AUTOMATION  
OF TECHNOLOGIES AND  
PRODUCTION



# АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОИЗВОДСТВА

№3 (13) октябрь 2016 г.

Международный научно-технический журнал

Учредитель: ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный  
технический университет им. Г.И. Носова»

## О журнале

Журнал «Автоматизированные технологии и производства» основан в 2012 году на базе сборника «Автоматизация технологических и производственных процессов в металлургии», который издавался кафедрой промышленной кибернетики и систем управления (с 2013 кафедра автоматизированных систем управления - АСУ) с 2004 по 2012 год. В журнале публикуются научные статьи, посвященные автоматизированным системам в промышленности, управлению технологическими процессами и качеством продукции, практическому применению современных методов управления и обучения сотрудников предприятий. Освещаются вопросы, связанные с моделированием систем управления, разработкой промышленных тренажеров и стендов для проведения научных исследований. Приоритетным направлением журнала является освящение результатов работ в области управления процессами черной металлургии, а также решения задач энерго- и ресурсосбережения с использованием оптимизирующих алгоритмов управления. Журнал предназначен для специалистов в области автоматизации технологических процессов, для работников производственных предприятий, эксплуатирующих системы автоматизации, проектных институтов и вузов, специализирующихся в области информационных технологий.

**Основные направления журнала:** автоматизированные системы управления технологическими процессами; системы контроля и управления качеством и экологичностью продукции; математическое моделирование и программное обеспечение производственных процессов; технические средства для автоматизации технологических процессов и производств; автоматизированные технологии в образовании; информационные системы.

## Редакция и редакционный совет

### Редакционный совет

*Председатель редакционного совета:*

Лисиенко Владимир Георгиевич - Вице-президент Академии инженерных наук, президент регионального Уральского отделения Академии инженерных наук, доктор технических наук, профессор ФГАОУ ВПО Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

*Заместитель председателя редакционного совета:*

Парсункин Борис Николаевич - доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВПО Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия

*Члены редакционного совета:*

Сарваров Анвар Сабулханович - доктор технических наук, профессор (МГТУ им. Г.И. Носова)  
Радионов Андрей Александрович - доктор технических наук, профессор (ЮУрГУ)

Карандаев Александр Сергеевич - доктор технических наук, профессор (МГТУ им. Г.И. Носова)  
Вдовин Константин Николаевич - доктор технических наук, профессор (МГТУ им. Г.И. Носова)  
Спирин Николай Александрович - доктор технических наук, профессор (УрФУ)  
Дмитриенко Валерий Дмитриевич - доктор технических наук, профессор (НТУ «ХПИ»)  
Ишметьев Евгений Николаевич - доктор технических наук (ЗАО КонСом)

### Редакция

*Главный редактор:*

Парсункин Борис Николаевич – доктор технических наук

*Заместитель главного редактора,*

*ответственный редактор:*

Рябчиков Михаил Юрьевич – кандидат технических наук

*Технический редактор:*

Рябчикова Елена Сергеевна – кандидат технических наук

## Контакты

**Главный редактор:** Парсункин Борис Николаевич  
Тел.: (3519) 29-85-58

**Редакционная коллегия:** Андреев Сергей Михайлович  
Тел.: (3519) 29-84-32

E-mail: atp@magtu.ru

Рябчиков Михаил Юрьевич

Тел.: +79028910112

E-mail: mr\_mgn@mail.ru

**Дизайн:** Рябчикова Елена Сергеевна

**Адрес редакции:** 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.  
E-mail: atp@magtu.ru

Журнал подготовлен к печати издательским центром МГТУ им. Г.И. Носова, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38. Отпечатан на полиграфическом участке МГТУ им. Г.И. Носова, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.

Выходит в свет 11.2016. Тираж 100 экз. Цена свободная.

**Автоматизированные системы управления***Т.С. Буканова, М.Т. Алиев*

Синтез системы управления электрической машиной с двумя степенями свободы ..... 4

**Информационные системы в автоматизированном производстве и образовании***В.И. Аникин, О.В. Аникина*

Имитационное моделирование многослойного перцептрона в электронных таблицах ..... 11

*Е.Е. Бизянов, А.А. Гутник*

Хранение нечетких чисел в реляционных базах данных информационных систем управления... 19

*А.Г. Лютов, С.Г. Гончарова,**В.Г. Крючков, И.Ф. Мезягутов*

Проектирование и внедрение лабораторного обучающего комплекса по направлению «Автоматизация технологических процессов и производств» ..... 24

**Математическое моделирование и программное обеспечение производственных процессов***В.И. Носков, А.Ю. Заковоротный,**Н.В. Мезенцев, Г.В. Гейко*

Моделирование электромеханической системы моторного вагона с учетом диссипативных сил.. 31

*Е.Л. Миркин, С.С. Нежинских*

Случайная стратегия автоматизированного синтеза топологии нейронной сети ..... 37

**Системы контроля и управления качеством и экологичностью продукции***А.Н. Заливин, Н.С. Балабанова*

Обнаружение движущихся объектов методом вычитания фона с использованием смеси Гауссовых распределений ..... 45

*А.Е. Филатова*

Морфологическая фильтрация полутоновых изображений на основе локальных статистик... 49

**Моделирование процессов и управление в металлургии***Е.М. Костылева*

Математическое моделирование напряженности электромагнитного поля, создаваемого дугowymi сталеплавильными печами трехфазного переменного тока ..... 56

*Е.Э. Бодров, А.Г. Рыбаков, С.И. Бодрова,**Е.С. Алейникова, М.В. Фёдорова*

Математическая модель клетки непрерывного стана холодной прокатки в относительных отклонениях величин ..... 60

*Д.Н. Тогобицкая, И.Р. Снизура*

Прогнозирование температур ликвидус и солидус металлургических расплавов на основе концепции направленной химической связи..... 64

*М.Ю. Рябчиков, Е.С. Рябчикова,**А.П. Берестов, А.У. Ахметова*

Разработка и адаптация моделей температурных режимов в протяжной печи башенного типа, учитывающих непостоянство внешних тепловых потерь ..... 70

**Automatic control systems***T.S. Bukanova, M.T. Aliyev*

Synthesis of a control system of the electrical machine with two degrees of freedom..... 4

**Information systems in computer-aided manufacturing and education***V. I. Anikin, O. V. Anikina*

Multilayer Perceptron Simulation in Spreadsheets..... 11

*Y.Y. Bizyanov, A.A. Hutnik*

Fuzzy numbers storing in relational databases of information Control system ..... 19

*A.G. Lyutov, S.G. Goncharova,**V.G. Kryuchkov, I.F. Mesyagutov*

Designing and introduction of laboratory training complex for automation of technological processes specialization ..... 24

**Mathematical modeling and software productions***V.I. Noskov, A.Y. Zakovorotniy,**N.V. Mezentsev, G.V. Gejko*

Modeling of railway carriage electromechanical system considering dissipative forces..... 31

*E.L. Mirkin, S.S. Nezhinskikh*

Random strategy of forming a self-organizing neural network topology..... 37

**Control and management systems for quality and environmental friendliness of production***A.N. Zalivin, N.S. Balabanova*

Moving objects detection using Gaussian Mixture Model ..... 45

*A.E. Filatova*

Morphological filtering of grayscale images based on local statistics..... 49

**Process simulation and management in metallurgy***E.M. Kostyleva*

Mathematical modeling of the electromagnetic field generated by the electric arc steelmaking furnaces, three-phase AC ..... 56

*E.E. Bodrov, A.G. Ribakov, S.I. Bodrova,**E.S. Aleynikova, M.V. Fedorova*

Mathematical model for rolling stand of the continuous cold rolling mill expressed in relative deviations ..... 60

*D.N. Togobitskaia, I.R. Snihura*

Forecasting of liquidus and solidus temperatures of metal melts on the basis of the concept of directed chemical bond ..... 64

*M.Y. Ryabchikov, E.S. Ryabchikova,**A.P. Berestov, A.U. Ahmetova*

Development and Mapping of Operating Temperature Models in Tower-Type Annealing Furnace Which Consider Variability of External Heat Losses ..... 70

# ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

## Оформление

**Количество авторов** – не более 5.

**Размер страницы:** – А4. Все поля – 20 мм.

**Стили:** УДК: TimesNewRoman, обычный, размер 12 пт, выравнивание по левому краю. **Заголовок статьи:** TimesNewRoman, полужирный, размер 12 пт, межстрочный интервал одинарный, выравнивание по центру. **Фамилия, инициалы авторов:** TimesNewRoman, полужирный курсив, размер 12 пт, межстрочный интервал одинарный, выравнивание по центру. **Сведения об организации и электронный адрес:** TimesNewRoman, курсив, размер 11 пт, межстрочный интервал одинарный, выравнивание по центру. Наличие эл. адреса хотя бы одного из авторов является обязательным. **Основной текст:** TimesNewRoman, обычный, размер 12 пт, межстрочный интервал одинарный, отступ первой строки абзаца 1,25 см, выравнивание по ширине. **Стиль для подзаголовков** (Введение, Актуальность работы, Основные проблемы и решения, Выводы, Заключение и т. д.): TimesNewRoman, полужирный курсив, размер 12 пт, межстрочный интервал одинарный, выравнивание по левому краю. Наличие подзаголовков не обязательно.

**Рисунки:** Размер рисунков не должен превышать размеров одной страницы; не допускается выполнение рисунков средствами MS Word; рекомендуется использование векторных форматов; не допускается обтекание рисунков текстом с группировкой подписи и рисунка в одно полотно (надпись); файлы рисунков необходимо также приложить отдельно; на все рисунки по тексту должны быть выполнены ссылки по шаблону – рис. номер; подпись рисунка строится по шаблону: Рис. Номер. Наименование рисунка.

**Таблицы:** Перед таблицей должна быть выполнена ссылка по формату – табл. номер. Все таблицы нумеруются и, при необходимости, именуется: шрифт TimesNewRoman, размер 11 пт, курсив. Выравнивание таблиц – по центру.

**Список литературы:** Список оформляется согласно ГОСТ 7.1–2003. Ссылки на использованные источники даются по тексту и обозначаются цифрами в квадратных скобках (например: [1]).

**Количество ссылок на источники:** не рекомендуется менее 8-ми.

**Самоцитирование:** не рекомендуется более 25% от общего числа ссылок.

**Оформление формул:** Формулы выполняются в редакторе MS Equation 3.0 и выравниваются по центру. Нумерация формул необходима, если по тексту есть ссылки на эти формулы. Номера формул (в круглых скобках) выравниваются по правому краю.

**Размерности величин** выбираются и обозначаются согласно ГОСТ 8.417-2002.

## Пример оформления

## Предоставление материалов

УДК 669.1:622

пустая строка

**Контроль качества металлургического агломерата с использованием модели восстановимости**  
**М.Ю. Рябчиков<sup>1</sup>, В.В. Гребенникова<sup>2</sup>, Е.С. Рябчикова<sup>3</sup>**  
*<sup>1,2,3</sup> ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.*

**Control of iron ore sinter properties with reducibility index model**  
*M.Y. Ryabchikov<sup>1</sup>, V.V. Grebennikova<sup>2</sup>, E.S. Ryabchikova<sup>3</sup>*  
*<sup>1,2,3</sup> Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia*  
*<sup>1</sup>mail@mail.ru*

пустая строка

*Аннотация, курсивом. Аннотация, курсивом. Аннотация, курсивом. Аннотация, курсивом. Аннотация, курсивом. Аннотация, курсивом. Аннотация, курсивом.*

**Ключевые слова:** *ключевые слова; ключевые слова; ключевые слова; ключевые слова; ключевые слова.*

*Abstract, italic. Abstract, italic.*

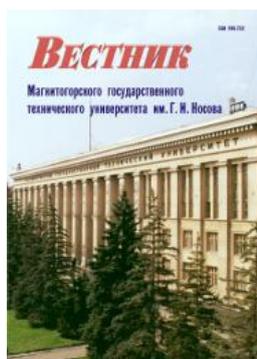
**Keywords:** *keywords; keywords; keywords; keywords; keywords; keywords.*

пустая строка

Для опубликования статьи в журнале необходимо представить в электронном виде по e-mail: [atr@magtu.ru](mailto:atr@magtu.ru) текст статьи, сведения об авторах и экспертное заключение о возможности опубликования. Контактный тел.: +79028910112 (Рябчиков Михаил Юрьевич, личный e-mail: [mr\\_mgn@mail.ru](mailto:mr_mgn@mail.ru)).

За достоверность научно-технической информации ответственность несет автор. Перепечатка материалов возможна только с письменного разрешения редакции. При перепечатке ссылка на «Автоматизированные технологии и производства» обязательна.

## Другие рекомендуемые периодические издания



Вестник магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова



Электротехнические системы и комплексы



Журнал молодых исследователей: магистров и аспирантов



Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах

УДК 681.532.55

## СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНОЙ С ДВУМЯ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ

Т.С. Буканова<sup>1</sup>, М.Т. Алиев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет»,  
г. Йошкар-Ола, Россия

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Марийский государственный университет»,  
г. Йошкар-Ола, Россия

<sup>1</sup>BukanovaTS@volgatech.net

**Аннотация.** Разработана модель управления частотой вращения электрической машины с двумя степенями свободы основанной на распределении динамического момента между внутренним и промежуточным роторами. Представлен оригинальный подход к построению системы управления электрической машиной с двумя степенями свободы и проведено имитационное исследование ее работы. В ходе анализа результатов проведенного эксперимента установлены основные закономерности функционирования электрической машины управляемой микропроцессорной системой.

**Ключевые слова:** электрическая машина, микропроцессорная система, имитационное исследование, эксперимент, система управления.

### Введение

В настоящее время автоматизированные технологические процессы во многих отраслях промышленности сопровождаются использованием электропривода для приведения в действие рабочих органов технологических машин. Основным направлением технического перевооружения промышленности является внедрение современных систем автоматического управления на базе единых модулей, объединяющих собственно электромеханические компоненты, которые управляются микроконтроллерами, персональными компьютерами или другими вычислительными средствами [1].

Около 90% электроприводов являются нерегулируемыми и используются в простых технологических аппаратах, при этом степень загруженности оборудования по мощности составляет 40-60%, что ведет к потерям энергии, а управление технологическими параметрами процесса происходит неэффективными методами. Переход от нерегулируемого электропривода к регулируемому является основным направлением улучшения показателей технологического процесса [1-3].

Управлять скоростью (частотой вращения) движения рабочего органа технологического аппарата средствами электропривода можно двумя методами: изменением угловой скорости электрической машины (ЭМ), путем искусственного воздействия на его электромеханические параметры, и изменением передаточного отношения механических передач, установленных между ЭМ и рабочим органом [4, 5].

Одним из перспективных методов совершенствования регулируемых электроприводов является конструктивное видоизменение ЭМ, одним из которых являются машины с двумя и более роторами, при этом внутренний

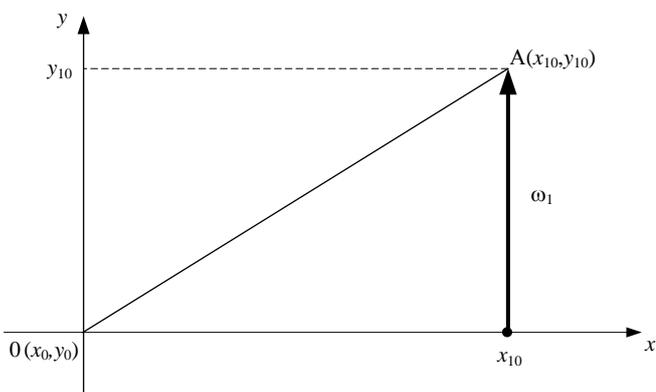
ротор – обычный, а второй ротор выполнен в виде полого цилиндра, статор – традиционной конструкции. Другим вариантом конструктивного видоизменения являются двухмерные ЭМ – машины, у которых вращается и ротор и статор. Это ЭМ с двумя степенями свободы, где внутренний и внешний ротор вращаются относительно друг друга в противоположные стороны [6].

Для оценки свойств ЭМ с двумя степенями свободы необходимо получить его основные характеристики. Имитационное исследование является одним из перспективных и наиболее распространенных методов изучения объектов исследования. Построение имитационной модели позволяет изучить функционирование объекта исследования и научиться правильно, управлять объектом путем апробирования различных вариантов управления, прогнозирования состояния объекта под действием внешних дестабилизирующих факторов [7, 8].

Целью работы является исследование системы управления ЭМ с двумя степенями свободы методом имитационного моделирования и получение переходных характеристик.

### Актуальность работы

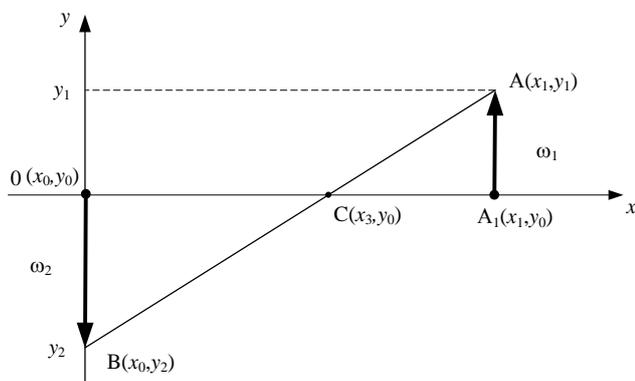
Несмотря на абстрактность математического подхода, для составления уравнения или системы уравнений используются определенные предпосылки, основанные на тех или иных фактах. Пусть исполнительное устройство описывается фазовой переменной  $\omega_1$  – частотой вращения. При этом исполнительное устройство имеет одну степень свободы. Модель исполнительного устройства представлена на рис. 1.



**Рис. 1. Модель исполнительного устройства с одной фазовой переменной**

Исполнительное устройство описывается в системе координат  $(x, y)$  относительно начала координат  $O(x_0, y_0)$ . Длина отрезка  $OA$  соответствует величине момента, приводящего во вращение исполнительное устройство, и однозначно для конкретного устройства определяется его проекциями на оси  $y$  и  $x$  ( $x_{10}, y_{10}$ ). Проекция т.А на ось  $y$  соответствует величине развиваемой частоты вращения исполнительного устройства  $\omega_1$  и определяется проекцией  $y_{10}$ . Частота вращения исполнительного устройства условно показана на рис. 1 вектором  $\omega_1$ , направление которого соответствует положительному направлению оси  $y$  и основному направлению движения устройства.

Для управления частотой вращения введем в исполнительное устройство дополнительную степень свободы – фазовую переменную  $\omega_2$ , характеризующую альтернативное вращательное движение, при условии, что вращающий момент его не изменяется. Модель исполнительного устройства представлена на рис. 2.



**Рис. 2. Модель исполнительного устройства с двумя фазовыми переменными**

Альтернативному вращательному движению  $\omega_2$  соответствует отрезок  $OB$ , длина которого равна его проекции  $y_2$  на ось  $y$ . На рис. 2 частота вращения исполнительного устройства условно показана вектором  $\omega_2$ , направление которого соответствует противоположному направлению оси  $y$  – это свидетельствует о противоположных направлениях основной и альтернативной частот вращения. Условие сохранения вращающего момента устройства, определенное отрезком  $AB$ , подтверждено следующими равенствами (1):

$$x_{10} = x_1, \quad |y_1| + |y_2| = |y_{10}|. \quad (1)$$

Последнее соотношение обеспечивает постоянную величину суммы движений устройства.

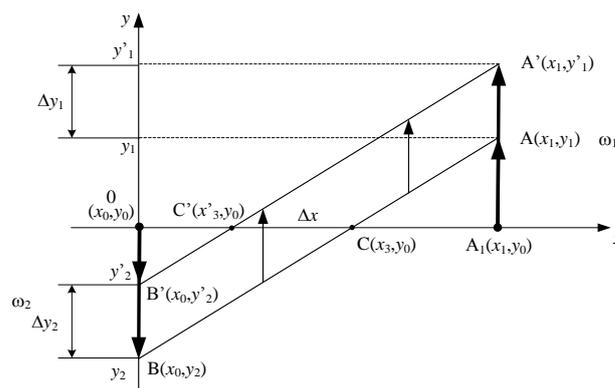
Отрезок  $AB$  пересекает ось  $x$  в точке  $C(x_3, y_0)$ , расположение которой определяет соотношение при распределении величин основного и альтернативного движений исполнительного устройства, суммарное значение которых не изменяется. Если принять величину частот вращения равной их проекциям на ось  $y$ , т.е.  $\omega_1 = |y_1|$  и  $\omega_2 = |y_2|$ , то выполняются следующие соотношения (2):

$$\frac{\omega_1}{AC} = \frac{\omega_2}{CB} = \frac{\omega_1 + \omega_2}{AB};$$

$$\frac{\omega_1}{x_1 - x_3} = \frac{\omega_2}{x_3} = \frac{\omega_1 + \omega_2}{x_1}. \quad (2)$$

Точка  $C$  пересечения оси  $A_1B_1$  определяет соотношение частот вращения  $\omega_1$  и  $\omega_2$  исполнительного устройства.

Управление частотой вращения ЭМ с двумя степенями свободы представлено на рис. 3 и заключается в смещении отрезка  $AB$ , регламентирующего вращающий момент исполнительного устройства, параллельно вверх или вниз, образуя смещение т.  $C$  на  $\Delta x$ .



**Рис.3. Модель управления частотой вращения электрической машины с двумя степенями свободы**

В начальном состоянии системы выполняются условия (2). Смещение точки  $C \rightarrow C'$  на  $\Delta x$  приводит к смещению  $AB \rightarrow A'B'$ , причем соблюдается условие  $AB \parallel A'B'$ . Смещение  $AB \rightarrow A'B'$  ведет к изменению величин частот вращения устройства; если ввести обозначение  $\omega'_1 = |y'_1|$  и  $\omega'_2 = |y'_2|$ , состояние исполнительного устройства будет описываться следующими формулами (3):

$$\frac{\omega'_1}{A'C'} = \frac{\omega'_2}{C'B'} = \frac{\omega'_1 + \omega'_2}{A'B'};$$

$$\frac{\omega'_1}{x_1 - x'_3} = \frac{\omega'_2}{x'_3} = \frac{\omega'_1 + \omega'_2}{x_1}. \quad (3)$$

Запишем последнее соотношение, используя приращения для частот вращения  $\Delta\omega_1 = \Delta y_1 = |y_1 - y'_1|$  и  $\Delta\omega_2 = \Delta y_2 = |y_2 - y'_2|$  относительно исходных частот вращения исполнительного устройства и с учетом выражения для смещения т.  $C \rightarrow C'$   $\Delta x = |x_3 - x'_3|$  и  $x'_3 = x_3 - \Delta x$  в виде соотношения (4):

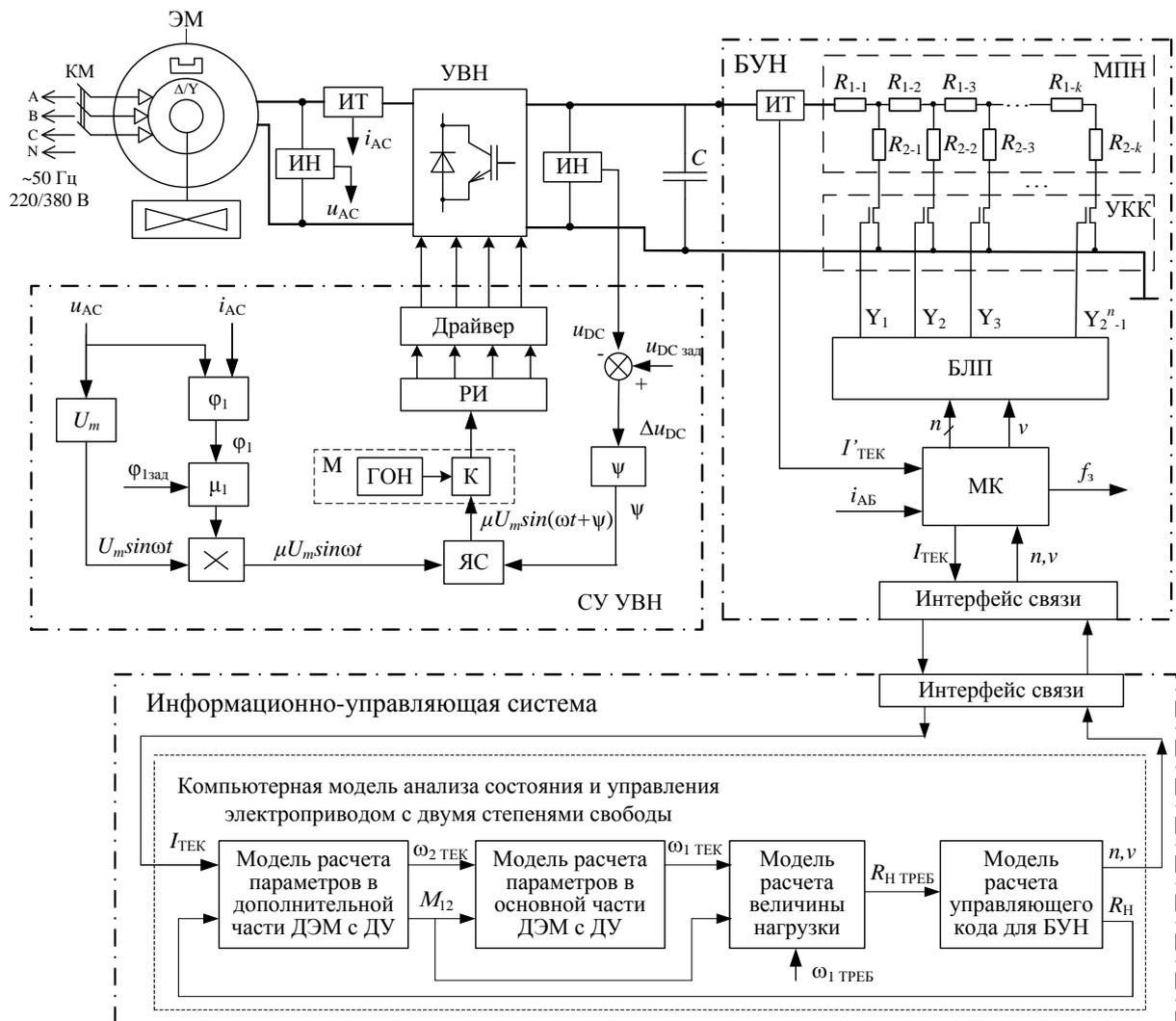


Рис. 4. Функциональная схема микропроцессорной системы управления электрической машиной с двумя степенями свободы:

КМ – контактор; УВН – управляемый выпрямитель напряжения; СУ УВН – система управления управляемым выпрямителем напряжения; ИН – измеритель напряжения; ИТ – измеритель тока; МПН – матрица полезной нагрузки; УКК – управляемые коммутируемые ключи; БЛП – блок логического преобразования; БУН – блок управления нагрузкой; МК – микроконтроллер; РИ – распределитель импульсов; К – компаратор; ГОН – генератор опорного напряжения; ЯС – ячейка сдвига; М – модулятор

$$\frac{\omega'_1 + \omega'_2}{x_1} = \frac{\omega_1 + \Delta\omega_1}{x_1 - (x_3 - \Delta x)} = \frac{\omega_2 - \Delta\omega_2}{x_3 - \Delta x}; \quad (4)$$

В случае управления для устройства соблюдается следующее равенство (5):

$$\frac{\omega'_1 + \omega'_2}{A_1 B_1} = \frac{\omega_1 + \Delta\omega_1 + \omega_2 - \Delta\omega_2}{AB} = \frac{\omega_1 + \omega_2}{AB} = const. \quad (5)$$

Следовательно, смещение  $\Delta x$  – величина приложенной нагрузки, ведет к изменению частот вращения  $\omega_1$  и  $\omega_2$  исполнительного устройства на  $\Delta\omega$ , при этом одна из частот вращения увеличивается, другая – уменьшается на  $\Delta\omega$ , т.е.  $\Delta\omega = \Delta\omega_1 = \Delta\omega_2$ . Сумма частот вращения остается постоянной  $\omega_1 + \omega_2 = const$ . Данное смещение характеризует распределение вращающего момента между основной и альтернативной частот вращения.

Суть управления основана на распределении дина-

мического момента между внутренним и промежуточным роторами, которая заключается в управлении сопротивлением нагрузочной цепи обмотки статора ЭМ с двумя степенями свободы [9].

### Основные проблемы и решения

Разработанная микропроцессорная система управления обеспечивает плавное изменение нагрузки по результатам анализа процессов на основании предложенной модели управления частотой вращения ЭМ с двумя степенями свободы и ее можно разделить на следующие части: информационно-управляющая система; матрица полезной нагрузки (МПН); блок управления нагрузкой (БУН).

На рис. 4 представлена функциональная схема микропроцессорной системы управления ЭМ с двумя степенями свободы.

Таблица истинности блока логического преобразования

№	Входы				Выходы											
					вариант 1 ( $v = 1$ )						вариант 2 ( $v = 2$ )					
	$X_n$	...	$X_2$	$X_1$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	...	$Y_{(2^n-2)}$	$Y_{(2^n-1)}$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	...	$Y_{(2^n-2)}$	$Y_{(2^n-1)}$
1	0	...	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0	...	0	0
2	0	...	0	1	1	0	0	...	0	0	1	0	0	...	0	0
3	0	...	1	0	1	1	0	...	0	0	0	1	0	...	0	0
4	0	...	1	1	1	1	1	...	0	0	0	0	1	...	0	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$2^n-1$	1	...	1	0	1	1	1	...	1	0	0	0	0	...	1	0
$2^n$	1	...	1	1	1	1	1	...	1	1	0	0	0	...	0	1

Информационно-управляющая система представляет собой компьютерную программу, которая на основе величины протекающего по нагрузке и обмотке дополнительной части электрического тока  $I$  восстанавливает текущие параметры ЭМ с двумя степенями свободы. На основе анализа восстановленных параметров, в частности частоты вращения внутреннего ротора  $\omega_1$ , и заданной требуемой частоты вращения  $\omega_{1\text{ТРЕБ}}$  происходит расчет величины требуемой нагрузки  $R_{\text{Н ТРЕБ}}$  в обмотке дополнительной части и формирование сигнала управления  $n$ . Процесс управления ЭМ с двумя степенями свободы заключается в подстройке частоты вращения внутреннего ротора  $\omega_1$  и сводится к управлению величиной нагрузки  $R_{\text{Н}}$  дополнительной части. Для изменения величины электрического сопротивления  $R_{\text{Н}}$  в цепи дополнительной части включен блок управления нагрузкой.

МПН представляет собой электрическую цепь из повторяющихся элементарных нагрузок с двумя номиналами  $R_{1-k}$  и  $R_{2-k}$ . Каждый отвод нагрузки  $R_{2-k}$  МПН соединен с общей шиной через управляемые коммутируемые ключи. Ключ замкнут, когда соответствующий ему выходной сигнал блока логического преобразования (БЛП) равен единице и наоборот. Исходя из структуры МПН, БУН реализует дискретное изменение сопротивления  $R_{\text{Н}}$ , включаемого в цепь дополнительной части ЭМ с двумя степенями свободы в зависимости от управляющего сигнала с БЛП [8].

БУН функционирует следующим образом. Сигналом управления  $v$  с информационно-управляющей системы определяется вариант функционирования БЛП, который по цифровому  $n$ -разрядному сигналу управления формирует исполнительные дискретные воздействия.

Первый и второй варианты принципа функционирования БЛП представлен в табл. 1. Характеристика изменения сопротивления МПН  $R_k$  при различных вариантах коммутации отводов представлена на рис. 5.

В данном случае двоичный код на выходе микропроцессорной системы преобразуется в количественное значение. Каждый выход  $Y_k$  БЛП управляет соответствующим ключом отвода ячейки МПН, причем согласно таблице 1 значению «0» соответствует неподключенная ячейка, а значению «1» – подключенная ячейка МПН БУН. Таким образом, сигналы с БЛП определяют количество подключенных ячеек матрицы БУН. При  $n$ -разрядном сигнале управления микропроцессорной системы возможно  $2^n$  вариантов управляющих сигналов, обеспечивающих подключение  $k = (2^n - 1)$  ячеек МПН БУН. Диапазон

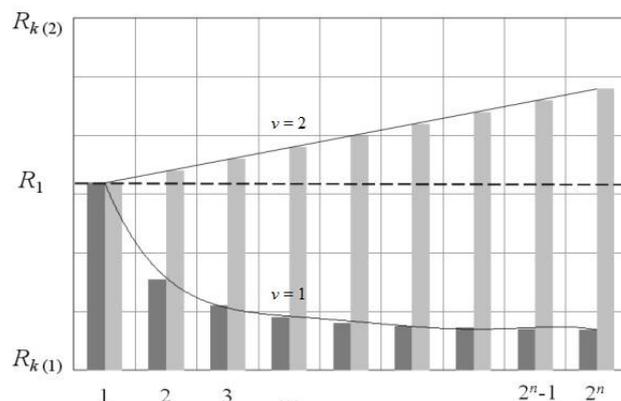


Рис.5. Изменение сопротивления матрицы полезной нагрузки

изменения характеристик определяется величиной  $k$  и величиной нагрузок  $R_{1-k}$  и  $R_{2-k}$  МПН БУН. Сопротивление МПН  $R_{k(1)}$  при подключении  $k$  ячеек согласно табл. 1 соответствует электрической нагрузке  $R_{\text{Н}}$  дополнительной части и определяется согласно формуле (6):

$$R_{k(1)} = R_{1-1} + R'_i, \quad (6)$$

$$R'_i = \begin{cases} R_{1-1}, & \text{если } i = 1 \\ \left( R_{1-i} + R'_{i+1} \right) \cdot R_{2-(i-1)} \Big|_{i=2, k}, & \text{если } i \geq 2 \end{cases}$$

где при  $i = k$  значение  $R'_{(i+1)} = R_{2-i}$ .

Согласно табл. 1 в случае второго варианта функционирования БЛП, при  $n$ -разрядном двоичном коде управления с микропроцессорной системы управления определяется замыкание только одного ключа, реализующего преобразование из двоичного кода в позиционный. Таким образом, позиция коммутируемого ключевого элемента определяет величину сопротивления  $R_{\text{Н}}$  МПН в цепи обмотки дополнительной части ЭМ. Сопротивление МПН  $R_{k(2)}$  при подключении  $k$ -ого отвода согласно табл. 1 соответствует нагрузке  $R_{\text{Н}}$  дополнительной части ЭМ с двумя степенями свободы и определяется согласно формуле (7):

$$R_{k(2)} = R_{2-k} + \sum_{i=1}^k R_{1-i}. \quad (7)$$

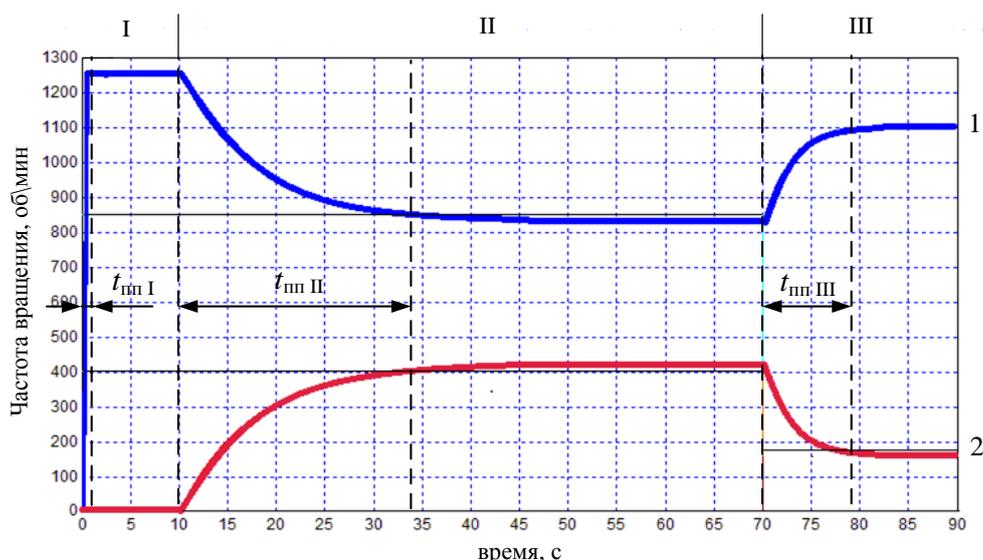


Рис. 6. Результаты имитационного исследования режимов работы микропроцессорной системы управления электрической машиной при изменении сопротивления нагрузки:

1 – внутренний ротор, 2 – промежуточный ротор;

I – режим включения двигателя ( $\omega_2=0$ ); II – режим расторможенных роторов;

III – резкое снижение электрической нагрузки

Таблица 2

Параметры и время переходного процесса при имитационном исследовании режимов работы электрической машины с двумя степенями свободы

Режим работы ЭМ	Время переходного процесса, с	Частота вращения внутреннего ротора, об/мин	Частота вращения промежуточного ротора, об/мин
I	1	1261	0
II	23	832	425
III	11	1105	153

Изменение сопротивления МПН при последовательном подключении  $v=1$  отводов от  $0..k$  происходит ступенчатое уменьшение его величины с экспоненциальным характером. Во втором случае коммутации при  $v=2$  обеспечивается равномерное ступенчатое линейное увеличение сопротивления МПН в зависимости от номера подключаемого отвода ключевого элемента. В общем случае при произвольном количестве позиций из  $k$  отводов и последовательности замыкания управляемые коммутируемые ключи  $\{\bar{s}_k\}$  выполняется преобразование к МПН с  $s$ -группами с последовательно-параллельным подключением элементов  $\bar{R}_{1-s}$  и  $\bar{R}_{2-s}$ , сопротивления которых находят по формулам (6) и (7). БЛП целесообразно реализовать на основе программируемых логических интегральных схем, работа которой характеризуется табл. 1 и 2 функционирования БЛП. Управление выбором активируемой таблицы функционирования БЛП происходит по значению сигнала  $v$ . Замыкание соответствующих ключей МПН определяется значением  $n$ .

Для получения переходных процессов ЭМ с двумя степенями свободы с микропроцессорной системой управления используется ступенчатое изменение входного воздействия. В рамках имитационных исследований проведена оценка характеристик при включении ЭМ с двумя степенями свободы и её реакции на ступенчатое изменение электрической и механической нагрузок [9, 10].

Диапазон частот вращения между роторами ЭМ с двумя степенями свободы зависит от конструктивного исполнения и приложенных внешних нагрузок и определяется формулой (8):

$$\omega_{\text{MIN}} = (1 - M_1/M_{\text{НОМ}}) \cdot \omega_{12}; \quad (8)$$

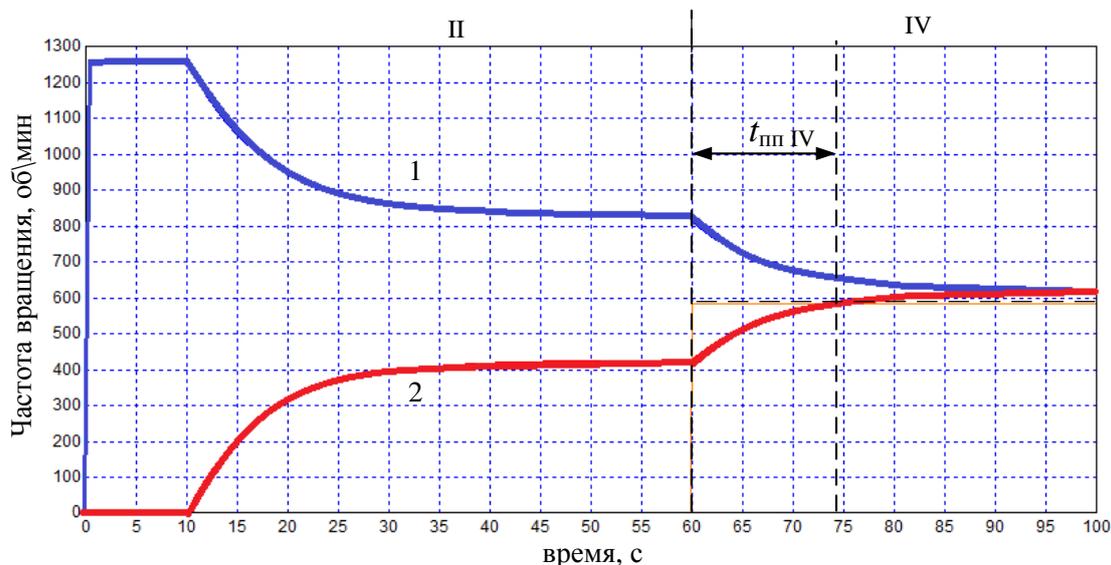
$$\omega_{\text{MAX}} = (M_{32}\omega_{2\text{MAX}})/M_1,$$

где  $M_{\text{НОМ}}$  – номинальный момент,  $\omega_{2\text{MAX}}$  – максимальная частота вращения,  $M_1$  – момент нагрузки.

При ступенчатом изменении сопротивления в нагрузочной цепи наблюдается резкое изменение электромагнитного момента устройства, который затем стремится возвратиться в исходное состояние.

ЭМ с двумя степенями свободы стремится возвратиться в равновесное состояние (равенство момента нагрузки  $M_1$  и электромагнитных моментов в основной и дополнительной частях ЭМ) – отработать задающий момент нагрузки при изменении внешнего фактора – сопротивления в нагрузочной цепи.

Результаты имитационного эксперимента, отражающие переходные процессы по переменным состояниям ЭМ с двумя степенями свободы – частотам вращения роторов приведены на рис. 6. Параметры и время переходного процесса  $t_{\text{пн}}$  для каждого режима, полученные методом имитационного моделирования микропроцессорной системы управления ЭМ, представлены в табл. 2.



**Рис. 7. Результаты имитационного исследования режимов работы микропроцессорной системы управления электрической машины при изменении механической нагрузки:**  
**1 – внутренний ротор, 2 – промежуточный ротор, II – режим расторможенных роторов, IV – резкое подключение дополнительной механической нагрузки**

**Таблица 3**

**Параметры и время переходного процесса при имитационном исследовании режимов работы электрической машины с двумя степенями свободы**

Режим работы ЭМ	Время переходного процесса, с	Частота вращения внутреннего ротора, об/мин	Частота вращения промежуточного ротора, об/мин
II	-	832	426
IV	14	621	613

Результаты имитационного моделирования функционирования микропроцессорной системы управления ЭМ при резком увеличении механической нагрузки представлены на рис. 7.

В начальный момент времени происходит пуск двигательной части при жестко закрепленном промежуточном роторе. В момент времени  $t = 10$  с, происходит растормаживание промежуточного ротора и установление частот вращения, что соответствует режиму расторможенных роторов (II).

После завершения переходного процесса в момент времени  $t = 60$  с на внутренний ротор резко набрасывается дополнительная механическая нагрузка (IV). Параметры и время переходного процесса для режимов ЭМ с двумя степенями свободы, полученные методом имитационного моделирования, представлены в табл. 3.

Режим IV предусматривает изменение амплитуды сигнала на входе механической нагрузки при моделировании работы устройства в режиме II. Данный режим предназначен для оценки адекватности математической модели при изменении внешнего задающего воздействия и получения характеристик переходных процессов.

В связи с влиянием величины механической нагрузки на частоту вращения внутреннего ротора ЭМ с двумя степенями свободы, для поддержания требуемой частоты вращения необходима система управления ЭМ, осуществляющая контроль и подстройку частоты вращения к требуемому заданному значению.

## Выводы

Анализ модели ЭМ с двумя степенями свободы позволил сделать вывод о преимущественном влиянии на переходные процессы массогабаритных параметров и формы роторов, которые определяют коэффициенты моментов инерции математической модели для каждого ротора, численно значительно отличающиеся друг от друга. В ходе проведения имитационного эксперимента были сняты основные параметры при моделировании различных режимов работы ЭМ с двумя степенями свободы.

Выявлено, что при использовании микропроцессорной системы управления ЭМ с двумя степенями свободы обеспечивается эффективное распределение частот вращения основного и дополнительного роторов.

Проведенные экспериментальные исследования доказывают возможность разработки ЭМ с двумя степенями свободы на основе предложенной модели управления частотой вращения исполнительного устройства.

## ЛИТЕРАТУРА

- Ильинский, Н. Ф. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение / Н. Ф. Ильинский, В. В. Москаленко. – Москва: Академия, 2008. – 201, [1] с.

2. Муравлева, О. О. Энергоэффективные асинхронные двигатели для регулируемого электропривода / О. О. Муравлева // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. № 7. – С. 135-139.
3. Муравлева, О. О. Оценка влияния энергетических характеристик асинхронного двигателя на энергосбережение насосного агрегата / О. О. Муравлева, Е. В. Вехтер, Т. В. Жарикова // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. № 1. – С. 174-178.
4. Hughes, A. Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications / A. Hughes. – 3rd Edition. – Oxford, UK: Newnes, 2006. – 410 p.
5. Nasar, S. A. Schaum's Outline of Electric Machines & Electromechanics (Schaum's Outline series) / Syed A. Nasar. – 2nd ed. – McGraw-Hill, 2007. – 224 p.
6. Справочник по электрическим машинам : В 2 т. Т. 1./ Под общ. ред. И. П. Копылова, Б. К. Клокова. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 455 с.
7. Донской, Н. В. Трёхфазная математическая модель асинхронного двигателя / Н. В. Донской // Электротехника. – 2011. – №1. – С. 40-46.
8. Бурулько, Л. К. Математическое моделирование частотно-регулируемых электроприводов / Л. К. Бурулько, Л. А. Паюк // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. № 2. – С. 200-203.
9. Буканова, Т. С. Способ управления и модель электрической машины с дифференциальным торможением/ Т. С. Буканова // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2011. – №10. – С.21-27.
10. Буканова, Т. С. Алгоритм управления электропривода с дифференциальным торможением / Т. С. Буканова, А. Б. Савиных, М. Т. Алиев // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып.5. – Тула: Изд-во ТулГУ. – 2012. –С. 120-129.

## SYNTHESIS OF A CONTROL SYSTEM OF THE ELECTRICAL MACHINE WITH TWO DEGREES OF FREEDOM

T.S. Bukanova<sup>1</sup>, M.T. Aliyev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>The Volga region state technological university, Yoshkar-Ola, Russia

<sup>2</sup>The Mari state university, Yoshkar-Ola, Russia

**Abstract.** The model of control of rotating speed by the electrical machine with two levels of freedom based on distribution of the dynamic moment between internal and intermediate rotors is developed. Original approach to creation of management system by the electrical machine with two levels of freedom is provided and the imitative research of its operation is conducted. During the analysis of the made experiment the main consistent patterns of functioning of the electrical machine are determined by a controlled microprocessor system.

**Keywords:** electrical machine, microprocessor system, imitative research, experiment, management system.

### REFERENCES

1. Il'inskij N. F., Moskalenko V. V. *Jelektroprivod: jenergo-i resursoberezenie* [Electric drive: power - and resource-saving], Moskva, Akademija, 2008, 201, [1] p.
2. Muravleva O. O. Energy efficient asynchronous engines for the adjustable electric drive [Jenergojeffektivnye asinhronnye dvigateli dlja reguliruемого jelektroprivoda], *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta* [News of the Tomsk polytechnical university], 2005.,no. 7, pp. 135-139.
3. Muravleva O. O., Vechter E. V., Zharikova T. V. An impact assessment of energetic characteristics of the asynchronous engine on energy saving of the pumping aggregate [Ocenka vlijanija jenergeticheskikh harakteristik asinhronnogo dvigatelja na jenergosberezenie nasosnogo agregata], *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta* [News of the Tomsk polytechnical university], 2005.,no. 7, pp. 174-178.
4. Hughes, A. Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications / A. Hughes. – 3rd Edition. – Oxford, UK: Newnes, 2006. – 410 p.
5. Nasar, S. A. Schaum's Outline of Electric Machines & Electromechanics (Schaum's Outline series) / Syed A. Nasar. – 2nd ed. – McGraw-Hill, 2007. – 224 p.
6. Kopylov I. P., Klovov B. K. *Spravochnik po jelektricheskim mashinam* V 2 t. T. 1 [Reference book on electrical machines: In 2 p. P. 1], Moscow, Jenergoatomizdat, 1988, 455 p.
7. Donskoj N. V. Three-phase mathematical model of the asynchronous engine [Trjohfaznaja matematicheskaja model' asinhronnogo dvigatelja], *Jelektrotehnika* [Electrician], 2011, no. 1, pp. 40-46.
8. Burul'ko L.K, Pajuk L.A. Mathematical modeling of frequency and adjustable electric drives [Matematicheskoe modelirovanie chastotno-reguliruemyh jelektroprivodov], *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta* [News of the Tomsk polytechnical university], 2006, no. 2, pp. 200-203.
9. Bukanova T. S. Sposob of management and model of the electrical machine with differential braking [Sposob upravlenija i model' jelektricheskoy mashiny s differencial'nym tormozheniem], *Mehatronika, avtomatizacija i upravlenie* [Mechatronics, automation and management], 2011, no. 10, pp. 21-27.
10. Bukanova T. S. Savinyh A. B., Aliev M. T. Algoritm of management of the electric drive with differential braking [Algoritm upravlenija jelektroprivoda s differencial'nym tormozheniem]. *Izvestija TulGU. Tehnicheskie nauki*. [Izvestiya TULGU. Technical science]. Tula, Izd-vo TulGU, 2012, no.5, pp. 120-129.

УДК 004.89

### ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНОГО ПЕРСЕПТРОНА В ЭЛЕКТРОННЫХ ТАБЛИЦАХ

В.И. Аникин<sup>1</sup>, О.В. Аникина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный университет сервиса», г. Тольятти, Россия

<sup>2</sup>ФГБОУ ВПО «Тольяттинский государственный университет», г. Тольятти, Россия

<sup>1</sup>anikin\_vi@mail.ru, <sup>2</sup>blue-waterfall@yandex.ru

**Аннотация.** В статье рассмотрена реализованная авторами табличная модель трехслойного персептрона, обучаемого, не прибегая к программированию на VBA Excel, алгоритмом обратного распространения ошибки. Представлены результаты модельных экспериментов с нейронной сетью на примере решения классической задачи Фишера о классификации цветков ириса. Подобраны оптимальные режимы обучения нейронной сети. Результаты работы могут быть использованы в образовательных учреждениях для визуализации алгоритмов обучения и работы искусственных нейронных сетей.

**Ключевые слова:** нейронная сеть, персептрон, табличная модель, классификация образцов, задача Фишера, визуализация.

#### Актуальность работы

С развитием информационных технологий, ростом мощности компьютеров и объемов анализируемых данных все более широкое применение в образовании и повышении квалификации находят моделирование и визуализация [1].

Задачи визуализации делятся на два больших класса: 1) анализ и визуализация данных, включая технологии Data Mining и визуализацию многомерных данных, например, посредством самоорганизующихся карт Кохонена [2-3], 2) визуализация информационной структуры и работы алгоритмов программ [4].

Обширный перечень программ визуализации различного вида данных представлен на сайтах [5-6], из которых по широте реализованного в них функционала можно выделить SAS Visual Analytics, Gephi, и, особенно, R благодаря наличию в последней встроенного языка программирования, основанного на матричных вычислениях, и впечатляющей графики. R можно эффективно использовать как мощную бесплатную интегрированную среду для интеллектуального и статистического анализа данных, математического и имитационного моделирования, оптимизации, численных вычислений и др., которая интенсивно развивается в последние годы и в настоящее время имеет более 8000 пакетов расширения.

Многочисленные попытки визуализировать работу алгоритмов предпринимались неоднократно, начиная, наверное, со времен Курта и Вирта. Великолепная подборка современных методов визуализации работы нескольких известных численных алгоритмов представлена на web-странице “Visualizing Algorithms” Бостока [7], однако практическая реализация этих методов требует недюжинной профессиональной подготовки в области программирования компьютерной графики.

Кроме того, каждый алгоритм (или, по крайней

мере, семейство сходных алгоритмов) требует своего, специфичного метода визуализации.

Цель данной работы – на примере разработки табличной модели многослойного персептрона показать, что достаточно простым и эффективным средством визуализации информационной структуры и работы алгоритмов являются электронные таблицы благодаря присущим им уникальным особенностям. Самой главной особенностью является то, что, как было показано нами ранее [8], любая табличная модель по существу является граф-машиной соответствующего этой модели алгоритма, чего не обеспечивает никакая другая программа визуализации алгоритмов и данных. Другими полезными особенностями электронных таблиц как эффективного средства визуализации данных и работы программ являются: динамическое условное форматирование ячеек, графическое отображение связей между зависимыми и влияющими ячейками, возможность табличной реализации алгоритмов без написания программного кода, погруженность модели в эффективную вычислительную среду и, наконец, широкая повсеместная доступность электронных таблиц.

В данной работе в электронной таблице Microsoft Excel создана модель трехслойной нейронной сети (НС) прямого распространения, которая опробована на примере решения классической задачи Фишера о классификации цветков ириса, выполнены многочисленные эксперименты для проверки качества работы созданной табличной модели НС. Преимуществом этой модели является то, что алгоритм обучения сети методом обратного распространения ошибки реализован встроенными табличными средствами Excel и не содержит пользовательского программного кода, который, как известно, в несколько раз замедляет быстрое действие любой электронной таблицы.

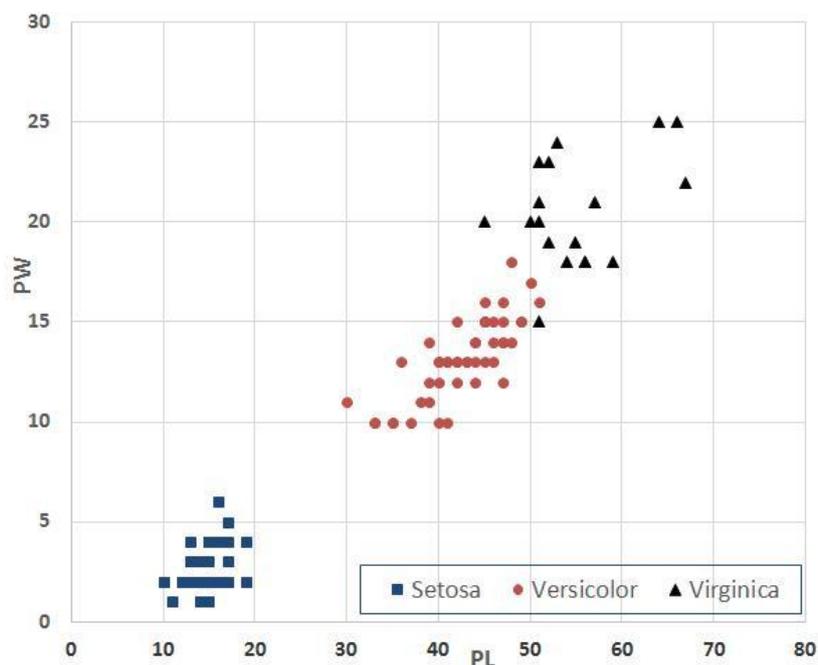


Рис. 1. Диаграмма рассеяния параметров PL и PW исходных образцов

Следует отметить, что в электронных таблицах, базируясь на концепции граф-машины алгоритма и принципе «программирование без программирования», можно визуализировать работу не только нейронных сетей прямого распространения, но и сетей RBF, Кохонена, Хопфилда, Хемминга и др. [9]

#### Постановка задачи

В задаче «Ирисы Фишера» рассматриваются три вида цветков ириса. Всего имеется по 50 экземпляров цветков каждого вида и для каждого из них измерены четыре параметра: длина (SL) и ширина (SW) чашелистика, длина (PL) и ширина (PW) лепестка (рис.1).

Параметры ирисов являются независимыми переменными, а вид ириса – зависимой переменной. Цель состоит в том, чтобы по данным таких измерений научиться предсказывать вид нового, неизвестного цветка.

#### Табличная модель НС для решения задачи Фишера об ирисах

Для решения задачи классификации цветков ириса разработана итерационная табличная модель трехслойной нейронной сети прямого распространения вида 4 – 6 – 3 (4 входа, скрытый слой из 6 нейронов, выходной слой из 3 нейронов) и алгоритма ее обучения методом обратного распространения ошибки с моментом.

Книга Excel, содержащая табличную модель нейронной сети для классификации цветков ириса, содержит шесть рабочих листов: *Данные*, *Обучение*, *Структура*, *График ошибки*, *НС*, *Перемешивание*.

На рабочем листе *Данные* (рис.2) производится предварительная обработка входных данных задачи об ирисах перед их использованием в нейронной сети.

Выполняются два вида обработки данных:

1. Интервалы изменения параметров SL, SW, PL, PW всех образцов ирисов нормируются к симметричному

интервалу  $[-\alpha, \alpha]$ , где  $0 < \alpha \leq 1$  – уровень ограничения. В нашем случае  $\alpha = 1$ , т.к. используемая сигмоидная функция отклика нейронов определена на отрезке  $[-1, 1]$ .

2. Перед использованием в нейронной сети образцы упорядочиваются (сортируются) по возрастанию их номеров в следующем порядке: учебные, контрольные, исключенные, неизвестные.

Исходные ненормированные образцы ирисов в количестве 150 штук (по 50 штук каждого вида) хранятся в диапазоне ячеек R11C13:R160C18, а 10 неизвестных образцов, которые нужно классифицировать, - в диапазоне ячеек R161C13:R170C18. Столбец *Класс* содержит номера классов образцов, где классы десяти неизвестных образцов помечены символом «?».

Значения столбца *Тип образца* могут редактироваться пользователем, что позволяет ему по своему усмотрению разделить все образцы ирисов на четыре непересекающихся типа:

- *тип 0* – учебные образцы, предназначены для обучения нейронной сети;
- *тип 1* – контрольные образцы, используются для контроля способности обученной НС к обобщению;
- *тип 2* – исключенные, резервные образцы, в экспериментах не используются, позволяют регулировать размер и состав обучающей и контрольной выборок;
- *тип 3* – неизвестные образцы, класс этих образцов неизвестен, именно его нужно определить с использованием обученной НС.

Для изменения типа некоторого образца пользователь должен ввести с клавиатуры значение 0, 1, 2 или 3 в соответствующую ячейку столбца *Тип образца*. В зависимости от введенного значения ячейка автоматически выделяется заливкой заданного цвета, поскольку в ячейках диапазона R11C18:R170C18 применено условное форматирование.

В ячейках диапазонов R7C13:R7C16 и R7C13:R7C16 вычисляются минимальное и максимальное значение параметров SL, SW, PL и PW образцов ирисов,

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
		<b>ИРИСЫ ФИШЕРА</b>																
		Учебных образцов		120				Сортировка		Уровень ограничения $\alpha$		1						
		Контрольных образцов		20				Сброс		43		20		10		1 мин.		
		Исключенных образцов		10						79		44		69		25 макс.		
		Неизвестных образцов		10														
		ВСЕГО		160														
		k	n	K1	K2	K3	X1	X2	X3	X4	n	SL	SW	PL	PW	Класс	Тип образца	
158	148	113	-1	-1	1	-0,6667	-0,5833	0,1864	0,3333		113	49	25	45	17	3	2	
159	149	124	-1	-1	1	0,0000	-0,5000	0,5593	0,0833		124	61	26	56	14	3	2	
160	150	136	-1	-1	1	-0,0556	-0,8333	0,3559	0,1667		136	60	22	50	15	3	2	
161	151	151	?	?	?	-0,9444	0,3333	0,3220	0,6667		151	44	36	49	21	?	3	
162	152	152	?	?	?	-0,8889	0,9167	-0,4237	-0,0833		152	45	43	27	12	?	3	
163	153	153	?	?	?	0,4444	0,6667	0,5593	0,6667		153	69	40	56	21	?	3	
164	154	154	?	?	?	-0,8333	0,8333	0,7627	1,0000		154	46	42	62	25	?	3	
165	155	155	?	?	?	-0,0556	0,7500	-0,6610	0,0833		155	60	41	20	14	?	3	
166	156	156	?	?	?	-2,2778	1,5000	1,3729	0,1667		156	20	50	80	15	?	3	
167	157	157	?	?	?	-0,3333	-0,2500	-0,0508	0,0833		157	55	29	38	14	?	3	
168	158	158	?	?	?	-0,6111	-0,1667	-0,8305	-0,7500		158	50	30	15	4	?	3	
169	159	159	?	?	?	0,5000	-0,3333	0,0169	0,1667		159	70	28	40	15	?	3	
170	160	160	?	?	?	-0,0556	-0,1667	0,5254	0,5833		160	60	30	55	20	?	3	
171																		

Рис. 2. Рабочий лист *Данные* табличной модели НС

которые используются для нормирования данных, подаваемых на входы нейронной сети.

В диапазоне ячеек R4C8:R7C8 с помощью функции СЧЁТЕСЛИ() вычисляется количество образцов ирисов, содержащихся в каждом из указанных четырех типов.

[R4C8] := СЧЁТЕСЛИ(R11C18:R170C18; 0) – учебных образцов

[R5C8] := СЧЁТЕСЛИ(R11C18:R170C18; 1) – контрольных образцов

[R6C8] := СЧЁТЕСЛИ(R11C18:R170C18; 2) – исключенных образцов

[R7C8] := СЧЁТЕСЛИ(R11C18:R170C18; 3) – неизвестных образцов

[R8C8] := СУММ(R[-4]C:R[-1]C) – всего образцов.

Диапазон ячеек R11C4:R170C10 содержит нормированные образцы ирисов, где K1, K2, K3 – значения видов образцов, закодированные методом «1-из-N»; X1, X2, X3, X4 – нормированные параметры SL, SW, PL, PW образцов ирисов.

Нормировка параметров осуществляется по формуле (1):

$$X_i = -\alpha + 2 \cdot \alpha \cdot \frac{P_i - P_{\min}}{P_{\max} - P_{\min}}, \quad (1)$$

где  $P_i$  – значение параметра  $i$ -го ириса.

[R11C4:R170C4] := ЕСЛИ(RC17=""?"; ""?"; ЕСЛИ(RC17=1; 1; -1))

[R11C5:R170C5] := ЕСЛИ(RC17=""?"; ""?"; ЕСЛИ(RC17=2; 1; -1))

[R11C6:R170C6] := ЕСЛИ(RC17=""?"; ""?"; ЕСЛИ(RC17=3; 1; -1))

[R11C7:R170C10] := -R4C17 + 2 \* R4C17 \* (RC[6]-R7C[6]) / (R8C[6]-R7C[6])

Сортировка образцов ирисов выполняется с

помощью внедренных на рабочий лист *Данные* кнопок *Сортировка* и *Сброс*.

Рабочий лист *Обучение* содержит табличную реализацию многослойного перцептрона вида 4 – 6 – 3 (4 входа, скрытый слой из 6 нейронов, выходной слой из 3 нейронов) и алгоритма его обучения методом обратного распространения ошибки.

Ячейки, реализующие скрытый слой нейронов, используют следующие формулы:

[R29C18: R29C21] := R[-4]C

[R30C18:R35C22] := ЕСЛИ(Start=1; ЕСЛИ(ieCnt<=!Exm; RC + R[52]C + R3C5 \* R[45]C; RC); R5C5 \* (СЛЧИС() – -0,5)) \* Структура!RC

[R30C23: R35C23] := СУММПРОИЗВ(R29C[-5]:R29C[-1]; RC[-5]:RC[-1])

[R30C24:R35C24] := ЕСЛИ(Структура!R36C24=0; RC[-1]/(ABS(RC[-1]) + Структура!R36C25) \*

\* Структура!RC24; RC[-1])

[R30C25:R35C25] := ЕСЛИ(Структура!R36C24=0; Структура!R36C25 / (Структура!R36C25 +

+ ABS(RC[-2]))^2; 1), где сигмоидный отклик нейронов задается функцией вида  $y(u_i) = u_i / (A + |u_i|)$ .

На рис.3 эскизно показана структура скрытого слоя табличной модели НС (диапазон ячеек R30C29:R39C32) на рабочем листе *Обучение*, состоящего из 6 нейронов.

Как видим, создание структуры многослойной нейронной сети в виде таблицы Excel не вызывает затруднений, главную сложность представляет табличная реализация итерационного алгоритма ее обучения.

В табличной модели этого алгоритма организуется цикл итераций (пересчетов рабочего листа Excel), на каждом проходе которого на входы НС подается очередной учебный образец.

X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	1			
W <sub>11</sub>	W <sub>12</sub>	W <sub>13</sub>	W <sub>14</sub>	W <sub>10</sub>	u <sub>1</sub>	y <sub>1</sub>	dy <sub>1</sub> /du <sub>1</sub>
W <sub>21</sub>	W <sub>22</sub>	W <sub>23</sub>	W <sub>24</sub>	W <sub>20</sub>	u <sub>2</sub>	y <sub>2</sub>	dy <sub>2</sub> /du <sub>2</sub>
W <sub>31</sub>	W <sub>32</sub>	W <sub>33</sub>	W <sub>34</sub>	W <sub>30</sub>	u <sub>3</sub>	y <sub>3</sub>	dy <sub>3</sub> /du <sub>3</sub>
W <sub>41</sub>	W <sub>42</sub>	W <sub>43</sub>	W <sub>44</sub>	W <sub>40</sub>	u <sub>4</sub>	y <sub>4</sub>	dy <sub>4</sub> /du <sub>4</sub>
W <sub>51</sub>	W <sub>52</sub>	W <sub>53</sub>	W <sub>54</sub>	W <sub>50</sub>	u <sub>5</sub>	y <sub>5</sub>	dy <sub>5</sub> /du <sub>5</sub>
W <sub>61</sub>	W <sub>62</sub>	W <sub>63</sub>	W <sub>64</sub>	W <sub>60</sub>	u <sub>6</sub>	y <sub>6</sub>	dy <sub>6</sub> /du <sub>6</sub>

Рис. 3. Структура скрытого слоя табличной модели Excel

Используя результаты прямого прохода сети в каждой итерации в обратном порядке (сначала для третьего слоя в диапазоне ячеек R57C30:R63C32 и R66C30:R72C32, затем для второго слоя в диапазонах R75C18:R80:C22 и R82C18:R87C22) по формуле (2) рассчитываются приращения синаптических весов  $\Delta w_{ij}$ .

$$\Delta w_{ij}^{(q)}(t) = -\mu \cdot \Delta w_{ij}^{(q)}(t-1) - \eta \cdot \delta_j^{(q)} \cdot y_j^{(q-1)}, \quad (2)$$

где  $w_{ij}$  - весовой коэффициент синаптической связи, соединяющей  $i$ -ый нейрон  $(q-1)$ -го слоя с  $j$ -м нейроном  $q$ -го слоя,  $\mu$  - коэффициент момента инерции,  $t$  - номер текущей итерации,  $\eta$  ( $0 < \eta < 1$ ) - подбираемый экспериментально коэффициент скорости обучения.

[R57C30:R63C32] := R[9]C  
[R65C30:R65C32] := R[-20]C  
[R66C29:R72C29] := R[-36]C  
[R66C30:R72C32] := R4C5 \* R45C \* RC29  
[R75C18:R80C22] := R[7]C  
[R82C17:R87C17] := R[-52]C25\*  
\*СУММПРОИЗВ(R65C[13]:R65C[15];R[-52]C[13]:R[-52]C[15])  
[R82C18:R87C22] := R4C5 \* RC17\*R29C

В каждой следующей итерации полученные значения  $\Delta w_{ij}$  используются для коррекции синаптических весов нейронов в ячейках диапазонов R30C18:R35C22 и R30C30:R36C32, затем снова выполняется прямой и обратный проходы сети и т.д., пока ошибка обучения не снизится до приемлемого уровня.

В ходе обучения НС учебные образцы подаются на входной слой (диапазон ячеек R29C18:R29C21) через входной порт данных, реализованный в диапазоне ячеек R23C13:R25C21:

[R23C15:R23C21] = RC[-1] + 1  
[R25C13] = R18C5  
[R25C14:R25C17] = СМЕЩ(Данные!R10C3; R25C13; R23C)  
[R25C18:R25C21] = СМЕЩ(Данные!R10C3; R25C13; R23C) \* Структура!R25C

Входной порт данных работает следующим образом. На каждой итерации в ячейке R18C5 генерируется номер  $k$  учебного образца из диапазона R11C2:R170C2 на листе *Данные*. Генерация номеров учебных образцов в

итерациях выполняется по одному из трех вариантов, выбираемых по желанию пользователя:

1. Учебные образцы подаются на входы НС последовательно, один за другим, в порядке возрастания номера  $k$  образца. Эта циклическая процедура подачи учебных образцов повторяется в следующих эпохах обучения до конца цикла итераций.
2. Номер  $k$  учебного образца генерируется случайно. Очевидно, что после многих эпох обучения все учебные образцы будут поданы на входы сети в среднем одинаковое число раз, хотя в каждой конкретной эпохе (благодаря случайному выбору) одни учебные образцы могут быть поданы на входы сети несколько раз, другие - ни разу.

Номера учебных образцов сначала перемешиваются случайным образом, а затем подаются на входы сети последовательно, как в первом варианте. Отличием этого варианта случайной генерации номеров от предыдущего является то, что теперь за одну эпоху на входы сети все учебные образцы подаются хаотически точно по одному разу.

Содержимое ячейки R18C5 (номер  $k$  очередного образца) копируется в ячейку R25C13 входного порта данных. По этому номеру в остальные ячейки входного порта данных принимаются параметры  $k$ -го учебного образца с листа *Данные*. Полученные через порт входные параметры учебного образца затем копируются на входы R23C18:R23C21 нейронной сети, а выходные параметры - в ячейки диапазона R43C30:R43C32, где они сравниваются со значениями  $y_i$ , полученными после прямого прохода НС, и используются для вычисления величины ошибки нейронов выходного слоя  $\delta_j^{(O)}$  (3).

$$\delta_j^{(O)} = (y_j^{(O)} - d_j) \frac{dy_j}{du_j}, \quad (3)$$

где  $\frac{dy_j}{du_j}$  - обыкновенная, а не частная производная,  $y_j^{(O)}$  -

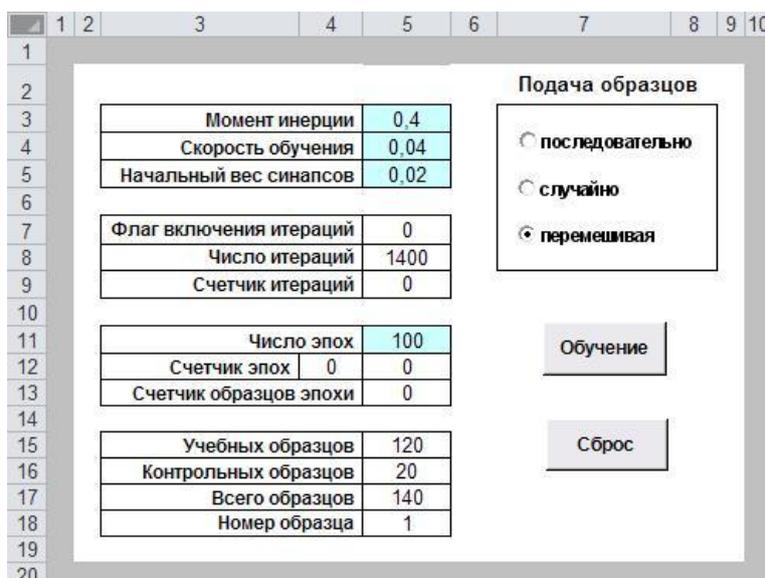
реальное выходное значение  $j$ -го нейрона выходного слоя ИНС,  $d_j$  - известное состояние выхода этого нейрона.

[R43C30:R43C32] := R[-18]C[-15]  
[R44C30:R44C32] := R[-6]C  
[R45C30:R45C32] := (R[-2]C-R[-1]C) \* R[-6]C

Пользовательский интерфейс табличной модели НС представлен на рис. 4. Входные ячейки модели, в которые пользователь может вводить данные, выделены заливкой. Остальные ячейки диапазона пользовательского интерфейса содержат формулы, изменять которые нельзя.

В ячейках пользовательского интерфейса используются формулы:

[R8C5] := eNum \* allExm - число итераций  
[R9C5] := ЕСЛИ(Start=1; iCnt+1; 0) - счетчик итераций  
[R12C5] := ЕСЛИ(Start=1; ЕСЛИ(ОСТАТ(iCnt;allExm)=0; eCnt+1; eCnt); 0) - счетчик эпох  
[R12C4] := eCnt  
[R13C5] := ЕСЛИ(Start=1; ЕСЛИ(ОСТАТ(iCnt;allExm)=0; allExm; ОСТАТ(iCnt;allExm)); 0) - счетчик образцов эпохи



d	1,0000	-1,0000	-1,0000
y	0,0017	-0,0055	-0,0017
$\delta_j$	0,9983	-0,9945	-0,9983

d	-1,0000	1,0000	-1,0000
y	-0,9990	1,0062	-1,0071
$\delta_j$	-0,0010	-0,0062	0,0071

Рис. 5. Величина ошибки  $\delta_j$  на трех выходах нейронной сети до и после 100 эпох обучения

[R15C5] := Данные!R4C8 – количество обучающих образцов  
 [R16C5] := Данные!R5C8 - количество контрольных образцов  
 [R17C5] := IExm + cExm - всего образцов  
 [R18C5] := ЕСЛИ(Start=1; ЕСЛИ(ieCnt>IExm; ЕСЛИ(ОСТАТ(iCnt;allExm)=0; allExm; ОСТАТ(iCnt;allExm)); ЕСЛИ(Cyclic; ЕСЛИ(ОСТАТ(iCnt;allExm)=0; allExm; ОСТАТ(iCnt;allExm)); ЕСЛИ(Randmized; 0 \* iCnt + СЛУЧМЕЖДУ(1; IExm); ИНДЕКС(RandNums; rndNum); ЕСЛИ(ОСТАТ(iCnt; allExm)=0;

Для удобства пользователей на рабочий лист *Обучение* внедрены следующие управляющие элементы: переключатель *Поддача образцов* и кнопки *Обучение* и *Сброс*.

Кнопка *Обучение* с помощью простого макроса StartBtn\_Click() запускает итерации обучения нейронной сети, кнопка *Сброс* с помощью макроса StopBtn\_Click() приводит НС в исходное необученное состояние. При сбросе сети синаптические веса нейронов принимают небольшие случайные значения в интервале  $\pm$ Начальный вес синапсов.

После завершения итераций последней командой макроса StartBtn\_Click() синаптические веса обученной НС из диапазонов R30C18:R35C22 и R30C30:R36C32 автоматически копируются на рабочий лист *НС*, содержащий копию обученной нейронной сети. Именно на этой обученной нейронной сети и выполняется затем классификация образцов ирисов.

Для запуска процесса обучения нейронной сети нужно выполнить следующие действия:

1. В ячейках *Момент инерции* (R3C5), *Скорость обучения* (R4C5), *Начальный вес синапсов* (R5C5) и *Число эпох* (R11C5) задать требуемые значения соответствующих параметров.
2. С помощью переключателя *Поддача образцов* выбрать вариант подачи на входы НС учебных образцов.
3. Нажать кнопку *Сброс* (рис. 4) для приведения нейронной сети в исходное необученное состояние.

Запустить итерации для обучения нейронной сети при введенных параметрах, нажав кнопку *Обучение*.

На рис. 5 показана величина ошибки  $\delta_j$  на выходах  $j=1..3$  необученной и обученной в течение 100 эпох нейронной сети для учебного образца с номером  $k = 76.allExm; ОСТАТ(iCnt;allExm))$ ); 1) - номер образца.

Заметим, после обучения сети в течение заданного в ячейке R11C5 числа эпох можно повторно нажать кнопку *Обучение*, и продолжить процесс обучения дальше. Можно предварительно изменить содержимое ячейки R11C5, тем самым увеличивая или уменьшая число эпох, которое будут пройдено в следующем цикле обучения, и даже выполнять итерации в шаговом режиме.

Диапазоны ячеек R49C37:R51C37, R50C41:R51C60 и R52C41:R53C45 рабочего листа *Обучение* содержат статистическую информацию о ходе процесса обучения нейронной сети.

Результаты статистического анализа процесса обучения НС в течение 20 первых эпох в графическом виде представлены на рабочем листе *График ошибки*.

Рабочий лист НС содержит:

- обученную нейронную сеть;

	1	2	3	4	5	6
2	Таблица подстановки					
4	Индекс образца		100	Обновить		
5	Номер образца		108			
6	Класс образца		3			
8	Доверительный уровень сверху		0,70			
9	Доверительный уровень снизу		-0,70			
11	Не классифицировано (обучение)		1			
12	Не классифицировано (контроль)		0			
14	Учебных образцов		120			
15	Контрольных образцов		20			
16	Исключенных образцов		10			
17	Неизвестных образцов		10			
18	ВСЕГО		160			
20	Выходы образца $d_i$		-1	-1	1	
21	Выходы сети $y_i$		-1,0064	-1,0381	1,0446	
22	Ошибка $b_i$		0,0064	0,0381	-0,0446	

Рис. 6. Результаты классификации образцов ирисов

- результаты классификации по обученным, контрольным и исключенным образцам (диапазон ячеек R5C39:R7C47) (рис.6).

Входные ячейки R8C3 и R9C3 используются для задания величины верхнего и нижнего уровней доверительного интервала, при превышении которого образцы считаются классифицированными. Чем ближе эти уровни к величине  $\pm 1$ , тем надежнее классификация, и тем сложнее становится обучить нейронную сеть. Следовательно, при экспериментальном выборе уровней доверительного интервала следует придерживаться определенного компромисса между надежностью классификации и сложностью обучения сети.

Ячейки R4C3:R6C3 предназначены для быстрого определения типа образца по его индексу. Для этого в ячейку R4C3 нужно ввести индекс интересующего вас образца и после нажатия кнопки *Обновить* в ячейках R5C3 и R6C3 будут выведены его порядковый номер и тип соответственно.

Рабочий лист НС содержит формулы:

[R5C3]: =R27C10  
[R6C3]: =СМЕЩ(R10C46; R4C3; 0)  
[R11C3]: =R7C41 – количество неклассифицированных учебных образцов  
[R12C3]: =ЕСЛИ(R15C3>0; R7C44; "-") - количество неклассифицированных контрольных образцов  
[R14C3]: =Данные!R4C8  
[R15C3]: =Данные!R5C8  
[R16C3]: =Данные!R6C8  
[R17C3]: =Данные!R7C8  
[R18C3]: =СУММ(R[-4]C:R[-1]C)  
[R20C3:R21C5]: =R[25]C[23]  
[R22C3:R22C5]: =ЕСЛИ(R[-2]C="?" ; "?" ; R[25]C[23])  
[R27C9]: =R4C3 - индекс образца  
[R27C10:R27C17]: =СМЕЩ(Данные!R10C3; R27C9; R25C) – диапазон содержит входные данные, взятые с листа *Данные*

В диапазоны R32C14:R37C18 и R32C26:R38C28 с листа *Обучение* копируются весовые коэффициенты, а в перечисленных ниже диапазонах ячеек с помощью указанных формул реализуются слои обученной нейронной сети:

R31C14: R31C17]: =R[-4]C  
[R32C19:R37C19]: =СУММПРОИЗВ(R31C[-5]:R31C[-1]; RC[-5]:RC[-1])  
[R32C20:R37C20]: =ЕСЛИ(Структура!R36C24=0; RC[-1] / (ABS(RC[-1]) + Структура!R36C25); RC[-1])  
[R32C21:R37C21]: =ЕСЛИ(Структура!R36C24=0; Структура!R36C25 / (Структура!R36C25 + ABS(RC[-2]))^2; 1)  
[R32C25:R37C25]: =RC[-5]  
[R39C26:R39C28]: =СУММПРОИЗВ(R[-7]C25:R[-1]C25; R[-7]C:R[-1]C)  
[R40C26:R40C28]: =ЕСЛИ(Структура!R38C33=0; R[-1]C / (ABS(R[-1]C) + Структура!R39C33) \* Структура!R[-2]C[4]; R[-1]C)  
[R41C26:R41C28]: =ЕСЛИ(Структура!R38C33=0; Структура!R39C33 / (Структура!R39C33 + ABS(R[-2]C))^2; 1).

В ячейках R45C26:R47C28 вычисляются величины ошибок нейронов выходного слоя:

[R45C26:R45C28]: =R[-18]C[-15]  
[R46C26:R46C28]: =R[-6]C  
[R47C26:R47C28]: =R[-2]C-R[-1]C

Таблица результатов работы нейронной сети по классификации образцов цветков ирисов (диапазон R11C34:R170C47) содержит формулы:

[R11C33:R170C33] – подставляемые значения таблицы подстановки, индексы образцов;  
[R10C34:R10C43] – ссылки на выходные ячейки, из которых берется результат подстановки;

[R11C34:R170C43] - таблица подстановки  
 [R11C44:R170C44] := RC[-11] – копия индексов образцов  
 [R11C45:R170C45]: =Данные!RC17  
 [R11C46:R170C46]: =ЕСЛИ(И(ABS(1-RC38)<=R8C4;  
 ABS(RC39)<=R9C4; ABS(RC40)<=R9C4); 1; ЕС-  
 ЛИ(И(ABS(RC38)<=R9C4; ABS(1-RC39)<=R8C4;  
 ABS(RC40)<=R9C4); 2; ЕСЛИ(И(ABS(RC38)<=R9C4;  
 ABS(RC39)<=R9C4; ABS(1-RC40)<=R8C4); 3; "?"))  
 [R11C47:R170C47]: =ЕСЛИ(RC[-2]=RC[-1]; "+";  
 ЕСЛИ(RC[-1]="?" ; "?" ; "-")  
 [R11C48:R170C48]: =RC[-14]

Таблица статистических результатов работы нейронной сети (диапазон R5C41:R7C47) содержит формулы:

[R5C41]: =СЧЁТЕСЛИ(СМЕЩ(R10C47; 1; 0; R14C3; 1); "+")  
 [R6C41]: =СЧЁТЕСЛИ(СМЕЩ(R10C47; 1; 0; Дан-  
 ные!R4C8;1); "-")  
 [R7C41]: =Данные!R4C8-R5C-R6C  
 [R5C44]: =СЧЁТЕСЛИ(СМЕЩ(R10C47; R14C3+1; 0;  
 R15C3;1); "+")  
 [R6C44]: =СЧЁТЕСЛИ(СМЕЩ(R10C47; R14C3+1;  
 0;R15C3;1); "-")  
 [R5C44]: =R15C3-R5C-R6C  
 [R5C47]: =СЧЁТЕСЛИ(СМЕЩ(R10C47; R14C3 + R15C3  
 + 1; 0; R16C3; 1); "+")  
 [R6C47]: =СЧЁТЕСЛИ(СМЕЩ(R10C47; R14C3 + R15C3  
 + 1; 0; R16C3; 1); "-")  
 [R7C47]: =R16C3-R5C-R6C

Рабочий лист *Структура* содержит маску, с помощью которой можно управлять структурой используемой нейронной сети. Вводя в некоторые ячейки маски вместо единиц значение 0, можно отключить отдельные входы, синаптические веса и нейроны сети, и, тем самым, активно изменять ее структуру.

Рабочий лист *Перемешивания* содержит 1000 выборок заранее перемешанных случайным образом номеров цветков ириса. Если при обучении сети используется вариант подачи образцов *Перемешивая*, то по нажатию кнопки *Сброс* выбирается одна из этих выборок, и после нажатия кнопки *Обучение* на входы сети учебные образцы подаются, следуя случайной нумерации, заданной содержимым ячеек выбранной строки рабочего листа *Перемешивания*.

### Выводы

Результаты экспериментов в разных режимах работы НС показали, что обученная нейронная сеть производит надежную классификацию учебных и контрольных образцов с минимальной среднеквадратичной ошибкой 0,035 за 50 эпох при скорости обучения  $\eta$ , лежащей в пределах 0,10..0,24.

Аналогичные эксперименты по изучению зависимости качества обучения нейронной сети от момента инерции (при прочих фиксированных параметрах) показали, что для данной задачи результаты работы сети практически не зависят от величины момента инерции.

Анализируя результаты модельных экспериментов, можно заключить, что наиболее эффективно и качествен-

но сеть производит классификацию учебных и контрольных образцов при следующих входных параметрах: скорость обучения - 0,10..0,24, начальный вес синапсов – 0,02, момент инерции – 0, режим подачи образцов – «Перемешивая».

Таким образом, на примере решения задачи Фишера показано, что табличная модель многослойного перцептрона эффективно и быстро обучается за несколько десятков эпох, отличается высокой наглядностью и может эффективно использоваться в учебном процессе для визуализации работы нейронной сети.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Пасько, А. Моделирование и визуализация на основе функционального представления в многоуровневой образовательной практике [Текст] / А. Пасько, В. Аджиев, Е. Маликова, В. Пилюгин. – Научная визуализация, т.4, №1, 2012. – с.1-11
2. Нейронные сети. STATISTICA Neural Networks: Методология и технологии современного анализа данных [Текст] / Под редакцией В. П. Боровикова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Горячая линия – Телеком, 2008. – 392 с.: ил.
3. Ultsch A. U\*-Matrix: a Tool to Visualize Clusters in High Dimensional Data [Текст] / A. Ultsch. Department of Computer Science, University of Marburg, Technical Report, 2003, N. 36. – P. 1-12
4. Воеводин, В.В. Параллельные вычисления [Текст] / В.В. Воеводин, Вл.В. Воеводин. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2002. – 608 с.
5. 39 Data Visualization Tools for Big Data [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://blog.profitbricks.com/39-data-visualization-tools-for-big-data/>
6. Datavisualization.ch. [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://selection.datavisualization.ch/>
7. Bostock, M. Visualizing Algorithms [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://bost.ocks.org/mike/algorithms/>
8. Аникин, В.И. Моделирование и визуализация информационной структуры алгоритмов в Microsoft Excel [Текст] / В.И. Аникин, О.В. Аникина. – Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах, №1(4), 2014, - с.21-28
9. Аникин, В.И. Моделирование нейронных сетей Хопфилда и Хемминга в Microsoft Excel [Текст] / В.И. Аникин, О.В. Аникина, Чичаева О.Н. – Информационные технологии и системы (ИТС 2015): материалы международной научной конференции.- Минск: БГУИР, 2015. – с.100-101

---

## MULTILAYER PERCEPTRON SIMULATION IN SPREADSHEETS

V. I. Anikin<sup>1</sup>, O. V. Anikina<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Volga State University of Service, Tolyatti, Russia

<sup>2</sup>Tolyatti State University, Tolyatti, Russia

**Abstract.** The paper presents the authors' spreadsheet model of a three-layer perceptron with back-propagation learning algorithm, implemented without programming in VBA Excel. The results of neural network model experiments on solving the classical problem of Fisher iris flowers classification are discussed. Optimal settings and options of neural network training are recommended. The results can be used in educational institutions to visualize the learning algorithms and functioning of artificial neural networks.

**Keywords:** neural network, perceptron, spreadsheet model, sample classification, Fisher problem, visualization

### REFERENCES

1. Pas'ko A., Adzhiev V., Malikova E., Pilyugin V. Modeling and Visualization based on functional performance in a multi-level educational practice [Modelirovanie i vizualizatsiya na osnove funktsional'nogo predstavleniya v mnogourovnevnoy obrazovatel'noy praktike], *Scientific visualization [Nauchnaya vizualizatsiya]*, 2012, t.4, no.1., pp.1-11
2. Neural Networks. STATISTICA Neural Networks: Metodologiya i tekhnologii sovremennogo analiza dannykh / Pod redaktsiey V. P. Borovikova. - 2-e izd., pererab. i dop. M.: Goryachaya liniya, Telekom, 2008, 392 p.
3. Ultsch A. U\*-Matrix: a Tool to Visualize Clusters in High Dimensional Data, Department of Computer Science, University of Marburg, Technical Report, 2003, N. 36. pp. 1-12
4. Voevodin V.V., Voevodin VI.V. Parallel'nye vychisleniya [Parallel computing], Sankt-Peterburg: BKhV-Peterburg, 2002, 608 p.
5. 39 Data Visualization Tools for Big Data. Available at: <https://blog.profitbricks.com/39-data-visualization-tools-for-big-data/>
6. Datavisualization.ch. Available at: <http://selection.datavisualization.ch/>
7. Bostock, M. Visualizing Algorithms. Available at: <https://bost.ocks.org/mike/algorithms/>
8. Anikin V.I., Anikina O.V. Modeling and visualization of algorithms' information structure in Microsoft Excel [Modelirovanie i vizualizatsiya informatsionnoy struktury algoritmov v Microsoft Excel], *Software of systems in the industrial and social fields [Matematicheskoe i programmnoe obespechenie sistem v promyshlennoy i sotsial'noy sferakh]*, 2014, no.14 (2), pp.21-28.
9. Anikin V.I., Anikina O.V., Chichaeva O.N. Neural networks modeling Hopfield and Hamming in Microsoft Excel [Modelirovanie neyronnykh setey Khopfilda i Khemminga v Microsoft Excel], *Informatsionnye tekhnologii i sistemy (ITS 2015) [Information Technologies and Systems 2015 (ITS 2015) proceeding of the International Conference]*, BSUIR, Minsk, Belarus, 2015, pp. 100-101.

## ХРАНЕНИЕ НЕЧЕТКИХ ЧИСЕЛ В РЕЛЯЦИОННЫХ БАЗАХ ДАННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Е.Е. Бизянов<sup>1</sup>, А.А. Гутник<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> ГОУ ВПО «Донбасский государственный технический университет», г. Алчевск, ЛНР

<sup>1</sup>bpeeecs@gmail.com

**Аннотация.** В статье проанализированы существующие методы и модели хранения нечетких чисел в базах данных информационных систем управления. Предложено хранить параметры нечетких чисел в виде строк, содержащих значения для точек перелома или коэффициентов функции аппроксимации. Проведено сравнение существующих моделей с моделью, предложенной в статье. Показано, что предложенная модель обеспечивает уменьшение объема хранимых данных, а также снижение времени доступа к нечетким данным за счет сокращения числа параметров выборки.

**Ключевые слова:** база данных, информационная система, нечеткое число, функция принадлежности.

### Актуальность работы

Во многих случаях свойства технических объектов и технологических процессов могут быть представлены в виде набора нечетких (неопределенных) параметров [1], от значения которых зависит качество управления, поэтому при построении систем управления техническими объектами и технологическими процессами часто приходится сталкиваться со сложностью, а зачастую – с невозможностью использования классического математического аппарата, используемого для синтеза детерминированных и стохастических систем. В этом случае целесообразно привлечь теорию нечетких множеств [2]. Однако при этом возникает проблема хранения параметров функций принадлежности для нечетких контроллеров.

На настоящий момент не существует коммерческих систем управления базами данных (СУБД), которые позволили бы непосредственно работать с нечеткими числами и лингвистическими переменными, что вынуждает исследователей разрабатывать собственные методы и модели для хранения и обработки нечетких данных [3-11]. При этом используются различные подходы: от разработки собственных до использования традиционных моделей (реляционных, иерархических, объектных).

При реализации той или иной модели для нечетких данных следует обращать внимание на возможность реализации в существующих СУБД, удобство использования при программировании доступа к базе данных, объемы хранимых данных, а также время доступа к базе данных.

### Основные проблемы и решения

Исследования, посвященные проблеме хранения нечетких данных, можно условно разделить на две группы: работы, посвященные разработке новых моделей данных [3, 4] и работы, направленные на практическую реализацию хранения нечетких данных с использованием существующих моделей данных [5-11].

Так, в [3] проведен обзор существующих нечетких логических моделей, которые предлагается разделить на

две категории: модели подобия, представляющие нечеткое отношение как декартово произведение нечетких подмножеств, и модели возможности, которые основаны на разделении нечетких данных на несколько видов: четкие данные, четкие интервалы, нечеткие множества, лингвистические множества.

В работе [4] предложена модель для хранения нечетких данных в реляционной базе данных (БД), содержащая следующие элементы: атрибуты для нечеткой обработки; информация о каждом атрибуте, основанная на его типе (информация различна для каждого из типов); другие объекты (нечеткие классификаторы, нечеткие квантификаторы и др.).

В [5, 6] принят табличный способ задания функции принадлежности в виде пар  $\mu(x_i)/x_i$  (уровень принадлежности/значение), при этом предполагается, что множество таких пар задает ломаную линию, которая и является графиком функции принадлежности.

В [7-9] рассмотрен подход к хранению нечетких данных в виде иерархической структуры. В частности, в [8] для этого предложено использовать язык расширенной гипертекстовой разметки XML, сопоставляя каждое значение нечеткой переменной ее четкому значению, например, минимальное и максимальное значения для носителя нечеткого множества, определяющего терм лингвистической переменной. Для реализации запросов в [8] рекомендуется использовать стандартный язык запросов SQL, извлекая при этом термины лингвистической переменной целиком. Авторы работы [9] предлагают метод для извлечения нечетких данных из объектно-ориентированных баз данных и преобразование их в нечеткие XML документы для веб-приложений.

В [10] в состав нечеткой БД предложено включить: традиционную БД, нечеткую базу метаданных, сервер SQL (Oracle или PostgreSQL), функции трансляции нечетких запросов, функции представления результатов нечетких запросов, функции нечеткого сравнения, нечеткий SQL-клиент. Авторы статьи [10] видят два пути реализации нечеткой БД: использование классических БД и добавление нечетких функций и механизмов обработки данных в систему.

Рассмотрим различные подходы к хранению нечет-

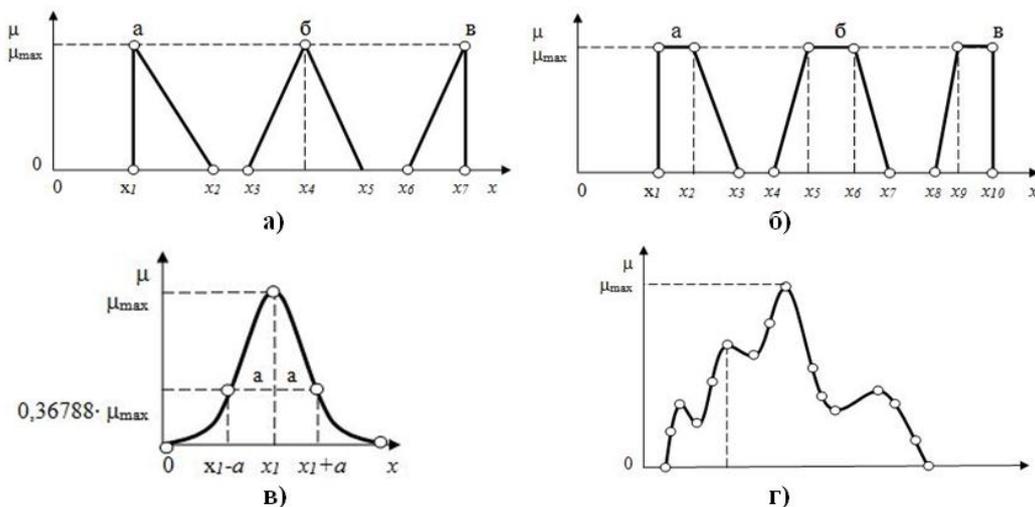


Рис. 1. Типовые функции принадлежности: а) треугольные, б) трапецидальные, в) гауссовского типа, г) произвольной формы

ких данных, исходя в первую очередь из формы их функции принадлежности. При этом отметим, что для практического использования целесообразно ограничить набор функций принадлежности до двух-трех, например, треугольной, трапецидальной и гауссовской [11].

На рис. 1, а-в приведены функции принадлежности нечетких множеств, которые можно отнести к типовым [1], а на рис. 1, г – функция принадлежности произвольной формы. На всех кривых функций принадлежности обозначены опорные точки.

В [11] предложено хранить типовые нечеткие числа в таблицах реляционных баз данных в виде кортежей:

$$\langle PK, FK_1, FK_2, \dots, FK_N, Data_1, Data_2, \dots, Data_M, T, Max, x_1, x_2, x_3, x_4 \rangle, \quad (1)$$

где  $PK, FK_1, FK_2, \dots, FK_N$  – первичный и внешние ключи таблицы базы данных соответственно;  $Data_1, Data_2, \dots, Data_M$  – атрибуты отношения, содержащие четкие данные;  $T$  – тип функции принадлежности нечеткого числа (например, 1 – треугольная, 2 – трапецидальная и т.п.);  $Max$  – максимальное значение функции принадлежности (мода нечеткого числа [1]);  $x_1, x_2, x_3, x_4$  – значения аргументов функции принадлежности, соответствующие точкам перелома.

Такой способ хранения нечетких чисел позволяет произвести переход от четких данных ( $Data_1, Data_2, \dots, Data_M$ ) к нечетким, не изменяя структуру существующей БД и не внося коррекции в программное обеспечение. Однако при таком подходе существенно увеличивается размер таблиц, и, соответственно, размер самой базы данных.

Данный способ можно модифицировать, объединив все данные в одну таблицу, в которой следует хранить точки перелома функции, а  $\alpha$ -уровни объединить в одну строку с разделителем, и параметры функций принадлежности можно хранить в виде кортежа:

$$\langle PK, T, SData \rangle, \quad (2)$$

где  $PK$  – первичный ключ таблицы базы данных;  $T$  – тип функции принадлежности нечеткого числа (см. пояснения к формуле (1));  $SData$  – строка, содержащая параметры нечеткого числа.

Строка  $SData$  должна быть переменной длины. Для нечеткого числа с трапецидальной функцией принадлежности (наибольшее число параметров для хранения) эта строка выглядит следующим образом: " $\alpha_{max}, x_1, x_2, x_3, x_4$ ", где  $\alpha_{max}$  – мода функции принадлежности, значения  $x_1, x_2, x_3, x_4$  – значения аргументов функции принадлежности, соответствующие точкам перелома.

Длина такой записи составляет всего 50 байт: 8 байт на ключевое поле, 8 байт на тип функции и 34 байта под параметры – размер которой может быть уменьшен изменением количества знаков после запятой для аргументов функции.

Проведем сравнение различных способов хранения нечетких чисел с типовыми функциями принадлежности. Так, при использовании способа, предложенного в [5, 6], и при условии хранения данных в виде набора значений для  $n$ -го количества  $\alpha$ -уровней, для получения значения функции принадлежности в произвольной точке необходимо:

- выбрать из таблицы базы данных нечеткое число;
- найти пару  $\alpha$ -уровней, между которыми располагается значение аргумента;
- произвести 5 математических операций для расчета по следующей формуле:

$$\mu_{cur} = \frac{\mu_n - \mu_{n-1}}{x_n - x_{n-1}} \cdot (x_{cur} - x_{n-1}), \quad (3)$$

где  $x_{cur}$  – произвольная точка, для которой нужно найти значение уровня принадлежности;  $\mu_{cur}$  – искомое значение уровня принадлежности в точке  $x_{cur}$ ;  $x_{n-1}, \mu_{n-1}$  – значение аргумента и уровня принадлежности для левой границы отрезка, которому принадлежит  $x_{cur}$  соответственно;  $x_n, \mu_n$  – значение аргумента и уровня принадлежности для правой границы отрезка, которому принадлежит  $x_{cur}$  соответственно.

При использовании предложенного в статье способа необходимо:

- выбрать из таблицы базы данных нечеткое число;

- произвести 4 математические операции для расчета по формулам:

$$\mu_{cur} = \frac{\mu_{max}}{x_{max} - x_{start}} \cdot (x_{cur} - x_{start}), \text{ при } x_{cur} \in [x_{start}; x_{max}] \quad (4)$$

$$\mu_{cur} = \frac{\mu_{max}}{x_{end} - x_{start}} \cdot (x_{end} - x_{cur}), \text{ при } x_{cur} \in [x_{max}; x_{end}] \quad (5)$$

где  $x_{cur}$  – произвольная точка, для которой нужно найти значение уровня принадлежности;  $\mu_{cur}$  – искомое значение уровня принадлежности в точке  $x_{cur}$ ;  $x_{start}$  – значение аргумента для функции принадлежности нечеткого числа равного 0 – левая граница носителя числа;  $x_{max}$  – значение аргумента для функции принадлежности нечеткого числа равного максимальному значению  $\mu$ ;  $x_{end}$  – значение аргумента для функции принадлежности нечеткого числа равного 0 – правая граница носителя числа;  $\mu_{max}$  – мода функции принадлежности нечеткого числа.

В случае трапецеидальной функции и расположении искомого значения  $x$  между двумя  $x_{max}$  (точки  $x_5$  и  $x_6$  на рис. 1, б), никаких расчетов производить не нужно.

Для хранения функций с произвольной формой функции принадлежности кортеж (6) необходимо расширить:

$$\langle PK, T, NAppr, SData \rangle, \quad (6)$$

где  $NAppr$  – степень аппроксимирующего полинома.

Для нечеткого числа с произвольной функцией принадлежности строка  $SData$  будет выглядеть так: " $k_0, k_1, k_2, k_3, \dots$ ", где  $k_0, k_1, k_2, k_3$  – коэффициенты функции аппроксимации.

Для большинства практических случаев представления функции принадлежности степенным полиномом может хватить и указанных 4-х коэффициентов, что соответствует полиному 3-го порядка.

Сравнительные данные по двум сравниваемым способам хранения нечетких чисел сведем в табл. 1. Размер записи определялся с учетом размера ключевого поля (BIGINT), все остальные значения – вещественные (DIGITAL). Первое значение при хранении функции принадлежности в виде набора пар X-Y (согласно [5, 6]) и десяти  $\alpha$ -уровнях, второе – при использовании предложенного способа. Количество значений для рис. 1, г задано для случая, когда на одном  $\alpha$ -уровне расположено два значения степени принадлежности, например, для полинома четвертого порядка.

Таблица 1

Параметры функций принадлежности

№ п/п	Функция принадлежности	Количество значений	Размер записи, байт
1	Рис. 1, а	20/4	168/43
2	Рис. 1, б	20/5	168/50
3	Рис. 1, в	20/4	168/43
4	Рис. 1, г	19/5	160/50

Как видно из табл. 1, предлагаемый способ хранения нечетких чисел обеспечивает сокращение объема хранимых данных в несколько раз. Тестирование выполнения запросов к таблицам базы данных, построенных по способу [5, 6] и предложенному способу (2) при условии занесения в указанные таблицы 10000 записей с произвольными значениями показало, что время выборки в случае использования предложенного способа ниже в среднем на 5-6%. Для тестирования использовались серверные СУБД MySQL и MS SQL Server.

Для обработки нечетких данных предлагается также ввести в базу данных следующие процедуры: удаления нечеткого числа  $FDELETE(table, code)$ , вставки нечеткого числа  $FINSERT(table, params)$ , обновления нечеткого числа  $FUPDATE(table, params)$ , выборки  $FSELECT(table, \mu_1, \mu_2, x_1, x_2)$ , где  $table$  – имя таблицы, хранящей коды нечетких чисел,  $code$  – код (первичный ключ) нечеткого числа,  $params$  – параметры нечеткого числа,  $\mu_1, \mu_2$  – значения функции принадлежности, между которыми осуществляется выборка,  $x_1, x_2$  – значения носителя нечеткого числа, между которыми осуществляется выборка.

Прокомментируем особенности реализации процедур обработки нечетких чисел.

При удалении возможны следующие ситуации:

- удаление конкретного нечеткого числа (по первичному ключу);
- удаление нечетких чисел, входящих в диапазон  $x$  и/или  $\mu$ .

Вставка – это операция добавления нового нечеткого числа в таблицу баз данных, не требующая комментариев.

При обновлении нечетких чисел возможны следующие ситуации:

- изменение параметров конкретного нечеткого числа (по первичному ключу);
- изменение параметров чисел, входящих в диапазон  $x$  и/или  $\mu$ .

При выборке возможны следующие ситуации (рис. 2):

- задание точного значения  $x^*$  или  $\mu^*$  (рис. 2, а);
- задание диапазона значений  $x$  или  $\mu$  (рис. 2, б).

Ниже приведен пример реализации процедуры выборки нечетких чисел, носители которых попадают в заданный диапазон (диалект MySQL):

```
PROCEDURE fuzzylogic.fuzzysselect (
IN InType INT,
IN InX1 DOUBLE,
IN InX2 DOUBLE)
DETERMINISTIC

BEGIN

CREATE TEMPORARY TABLE
IF NOT EXISTS `temp``
```

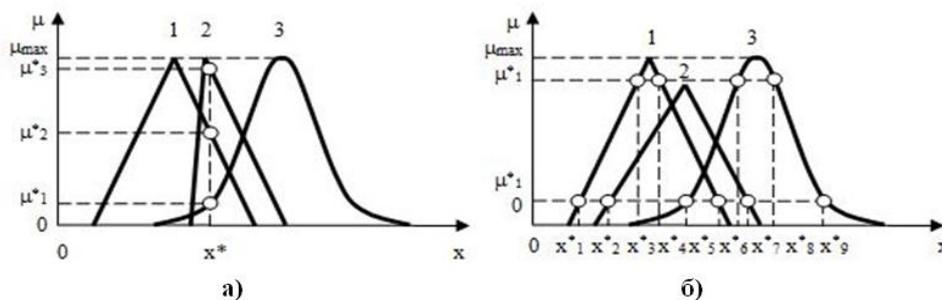


Рис.2. Выборка из нечеткой базы данных: а) задание точных значения, б) задание диапазона значений

```
(id_ft int, fData varchar(255),
minX DOUBLE, maxX DOUBLE);
IF InType=2 THEN
  INSERT temp(id_ft, fData,minX, maxX)
  SELECT id_ft, fData,
    SUBSTRING_INDEX(SUBSTRING_INDEX
(fData, ';', 2), ';', -1),
    SUBSTRING_INDEX(SUBSTRING_INDEX
(fData, ';', 5), ';', -1)
  FROM
    fuzzy_test WHERE fType = InType;
ELSE
  INSERT temp(id_ft, fData,minX, maxX)
  SELECT id_ft, fData,
    SUBSTRING_INDEX(SUBSTRING_INDEX
(fData, ';', 2), ';', -1),
    SUBSTRING_INDEX(SUBSTRING_INDEX
(fData, ';', 4), ';', -1)
  FROM
    fuzzy_test WHERE fType = InType;
END IF;

SELECT * from temp WHERE minX < InX1
AND
InX2 < maxX;
DROP TEMPORARY TABLE temp;
END
```

Входными параметрами процедуры являются: тип функции (InType) и искомый диапазон, заданный двумя числами (InX1, InX2). Данная процедура в зависимости от типа функции принадлежности создаёт временную таблицу *temp*, в которой хранятся левая и правая границы носителя нечеткого числа, а также строка *SData* из формулы 2. После этого выбираются те записи, которые содержат искомый диапазон.

### Заключение

Проведенные исследования существующих методов и моделей для хранения нечетких данных в базах данных информационных систем показали, что на настоящий момент нет СУБД, которые позволяли бы непосредственно оперировать нечеткими числами, а известные модели нечетких баз данных опираются на уже существующие реляционные модели.

Предложено хранить нечеткие числа с типовыми функциями принадлежности в реляционных базах данных, записывая их параметры в одной строке с разделителями, а при произвольной форме функции принадлежности нечеткого числа предложено хранить в таблице базы данных значения коэффициентов аппроксимирующего полинома.

Проведенное тестирование показало, что предложенный способ хранения нечетких чисел обеспечивает уменьшение требуемых объемов дисковой памяти для их хранения, а также уменьшение времени доступа к данным.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление / А. Пегат; пер. с англ. – М.: БИНОМ; Лаборатория знаний, 2011. – 798 с.: ил. – (Серия «Адаптивные и интеллектуальные системы»).
2. Чернов В.Г. Нечеткие контроллеры. Основы теории и построения: Учеб. пособие по курсу «Интеллектуальные системы управления». – Владим. гос. ун-т.: Владимир, 2003 – 148 с.
3. Глоба Л.С. Подход к хранению баз нечетких знаний / Л.С. Глоба, М.Ю. Терновой, Е.С. Штогринина // OSTIS-2012. – С. 99-102.
4. Jose Galindo. Fuzzy databases: modeling, design and implementation / Jose Galindo, Angelica Urrutia, Mario Piattini // IGP in USA, – 2006.
5. Азов М.С. Прикладные интеллектуальные системы, основанные на мягких вычислениях / под ред. Н. Г. Ярушкиной. – Ульяновск: УлГТУ, 2004 – 139 с.
6. Касаткина С.В. Методы хранения и обработки нечетких данных в среде реляционных систем / Н.В. Касаткина, С.С. Тянянский, В.А. Филатов // ААЭКС. – «Информационно-управляющие комплексы и системы». – 2009. – № 2(24).
7. Сергиенко М.А. Методы проектирования нечеткой базы знаний / М.А. Сергиенко // Вестник ВГУ, Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2008. – № 2. – С. 67-71.
8. Naresh Kumar. Storing, Querying and Validating Fuzzy XML Data in Relational Database / Naresh Kumar, Satyanand Reddy, V.E.S. Murthy // (IJCSIT) International Journal of Computer Science and Information Technologies, Vol. 5 (4), 2014, pp. 5233-5240.
9. Jian Liu. Formal transformation from fuzzy object-oriented databases to fuzzy XML / Jian Liu, Z. M. Ma // Applied Intelligence Volume 39, Issue 3, 2013, pp 630–641
10. Amit Garg. Querying Capability Enhancement in Database Using Fuzzy Logic / Amit Garg, Dr. Rahul Rishi // Global Journal of Computer Science and Technology Volume 12 Issue 6 Version 1.0 March 2012.
11. Бизянов Е.Е. Имплементация нечетких моделей в информационные системы экономических объектов / Е.Е. Бизянов // Экономика и менеджмент инновационных технологий. – 2015. – № 4-1 (43). – С. 67-71.

---

# FUZZY NUMBERS STORING IN RELATIONAL DATABASES OF INFORMATION CONTROL SYSTEM

Y.Y. Bizyanov<sup>1</sup>, A.A. Hutnik<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Donbass State Technical University, Alchevsk, LPR

**Abstract.** The article analyzes the existing methods and models of storage fuzzy numbers in the databases of information control systems. Proposed to store the fuzzy numbers parameters as a string, which contains the values of fracture points or the approximation coefficients. Comparison the existing models with the model proposed in the article was making. Shown that the proposed model will decrease the level of stored data and will reduce data access time by reducing the parameters of selection.

**Keywords:** database, information system, data model, fuzzy number, the membership function.

## REFERENCES

1. Pegat A. *Nechetkoe Modelirovanie i Upravlenie - per. s angl.* [Fuzzy Modeling and Control], Moscow, BINOM, 2011, 798 p
2. Chernov V.G. *Nechetkie Kontrollery. Osnovy Teorii i Postroeniya: Ucheb. posobie po kursu «Intellektual'nye Sistemy Upravleniya»* [Fuzzy Controllers. Bases of the Theory and Constructing], Vladimir, Vladimir State University, 2003, 148 p
3. Globa L.S., Ternovoy M.Y., Shtogrina O.S. Approach for Storing Fuzzy Knowledge Bases [Podkhod k khraneniyu baz nechetkikh znaniy], Open Semantic Technologies for Intelligent Systems, Minsk, 2012, pp. 99-102.
4. Jose Galindo. Fuzzy Databases: Modeling, Design and Implementation / Jose Galindo, Angelica Urrutia, Mario Piattini // IGP in USA, – 2006.
5. Azov M.S. *Prikladnye Intellektual'nye Sistemy, Osnovannye na Myagkikh Vychisleniyakh pod red. N. G. Yarushkinoy* [Applied Intellectual Systems Based on Soft Computing], Ulyanovsk, UISTU, 2004, 139 p
6. Kasatkina S.V., Tanyanskiy S.S., Filatov V.A. Methods of Storage and Processing Fuzzy Data in Relational Systems [Metody Khraneniya i Obrabotki Nechetkikh Dannykh v Srede Relyatsionnykh System], *Informatsionno-Upravlyayushchie Kompleksy i Sistemy [Information and Control Complexes and Systems]*, 2009, no.2(24), pp. 80-86
7. Sergienko M.A. Methods of Designing Fuzzy Knowledge Base [Metody Proektirovaniya Nechetkoy Bazy Znaniy], *Vestnik VGU [Proceeding of Voronezh State University]*, 2008, no.2, pp. 67-71
8. Naresh Kumar. Storing, Querying and Validating Fuzzy XML Data in Relational Database / Naresh Kumar, Satyanand Reddy, V.E.S. Murthy // (IJCSIT) International Journal of Computer Science and Information Technologies, Vol. 5 (4) , 2014, pp. 5233-5240.
9. Jian Liu. Formal Transformation from Fuzzy Object-Oriented Databases to Fuzzy XML / Jian Liu, Z. M. Ma // Applied Intelligence Volume 39, Issue 3, 2013, pp 630–641
10. Amit Garg. Querying Capability Enhancement in Database Using Fuzzy Logic / Amit Garg, Dr. Rahul Rishi // Global Journal of Computer Science and Technology Volume 12 Issue 6 Version 1.0 March 2012.
11. Bizyanov E.E. Implementation Fuzzy Models in the Information Systems of Economic Objects [Implementatsiya Nechetkikh Modeley v Informatsionnye Sistemy Ekonomicheskikh Ob"ektov], *Ekonomika i Menedzhment Innovatsionnykh Tekhnologiy [Electronic Scientific & Practical Journal «Economics and Innovations Management»]*, 2015, no.4-1(43), pp. 67-71

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ВНЕДРЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО ОБУЧАЮЩЕГО КОМПЛЕКСА ПО НАПРАВЛЕНИЮ «АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПРОИЗВОДСТВ»

А.Г. Лютов<sup>1</sup>, С.Г. Гончарова<sup>2</sup>, В.Г. Крючков<sup>3</sup>, И.Ф. Месягутов<sup>4</sup>  
1,2,3,4 ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет»,  
г. Уфа, Россия

<sup>4</sup>kats\_ugatu@mail.ru

**Аннотация.** Предлагаются три направления усовершенствования лабораторной базы и ее организации по направлению «Автоматизация технологических процессов и производств»: создание универсальных стендов с использованием модульного принципа проектирования; разработка и внедрение виртуальных лабораторий; формирование баз данных по лабораторным работам. Приведенные мероприятия позволяют повысить эффективность учебного процесса в условиях постоянного обновления средств автоматизации, в условиях внедрения автоматизации во всевозможные сферы народного хозяйства, а также облегчают реализацию компетентного подхода в учебном процессе.

**Ключевые слова:** системы автоматизации и управления; лабораторные стенды; виртуальные лаборатории.

### Введение

В настоящее время автоматизация охватывает практически все отрасли народного хозяйства. Поэтому в учебном процессе по направлению «Автоматизация технологических процессов и производств» необходимо ориентировать студентов на способность адаптации их профессиональной деятельности к автоматизации и управлению объектами и процессами в различных отраслях промышленности, на транспорте, в связи, в жилищно-коммунальном хозяйстве и других отраслях.

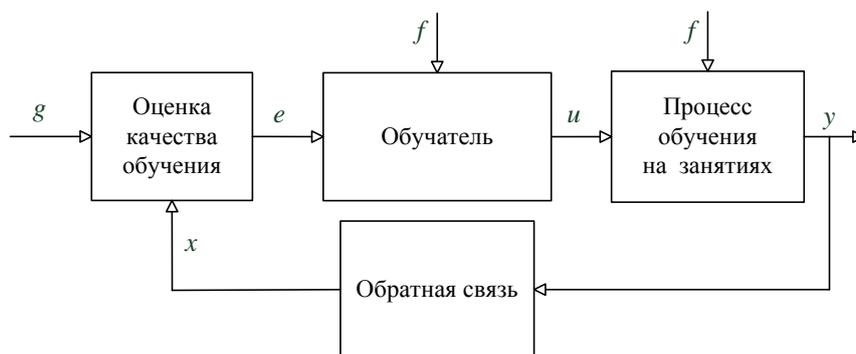
С появлением новых Федеральных государственных образовательных стандартов (ФГОС) организация учебного процесса должна переходить на новый качественный уровень. Согласно ФГОС при подготовке студентов следует исходить из требований работодателей к выпускникам. Эти требования сформулированы в виде компетенций по определенным видам профессиональной деятельности (проектно-конструкторской, производственно-технологической, научно-исследовательской, организационно-управленческой, научно-педагогической, сервисно-эксплуатационной и специальным видам) и соответствующих им знаний, умений, навыков.

Одна из задач кафедры – это оснащение лабораторий учебными стендами, имитирующими системы промышленной автоматизации, на которых студенты могут применить полученные знания и приобрести умения и навыки работы с устройствами автоматизации, овладевая соответствующими компетенциями [1]. Постановка и решение этой задачи имеет ряд особенностей и проблем. Во-первых, средства автоматизации очень быстро усовершенствуются. На смену морально устаревшим автоматизированным системам и оборудованию приходят системы и устройства с новыми принципами работы, новыми функциями, новыми архитектурами, программным и информационным обеспечением. Появляются качественно новые стандарты на разработку систем управления. В настоящее время бурно развивается и внедряется концепция распределенных и многоуровне-

вых иерархических систем управления на базе сетевых технологий. Во-вторых, объекты автоматизации могут быть самой различной физической природы. В-третьих, приобретение и эксплуатация лабораторных стендов всегда связана с дефицитом ресурсов (денежных средств, площадей, высококвалифицированных кадров). Другими словами в лабораториях одной кафедры нереально иметь все разнообразие современных программно-технических средств, на которые ориентирована профессиональная деятельность выпускника. До настоящего времени имеющееся в лабораториях оборудование позволяло получить умения и навыки лишь на концептуальном уровне или только в нескольких определенных областях автоматизации. Дефицит оборудования в учебном процессе восполнялся путем абстрагирования предметной области. С помощью различных математических аппаратов и математических программных пакетов моделировали технологические процессы, работу технологического оборудования и устройств автоматизации. А приобретение умений и навыков работы с промышленными системами автоматизации частично возлагалось на производственную и преддипломную практику.

Используя методы системного анализа и синтеза, а также концепцию Растригина Л.А. «Управление как обучение», описанную проблемную ситуацию можно формализовать как задачу проектирования лабораторного обучающего комплекса. В целом система обучения представляет собой многофункциональную иерархическую систему, состоящую из набора подсистем. Каждая подсистема реализует свой аспект, например организацию и управление, планирование, самодиагностику, управление ресурсами, проведение занятий и многие другие.

Обобщенная структурная схема подсистемы обучения исполнительского уровня, связанного с проведением занятий, представлена на *рис. 1*.



**Рис. 1. Подсистема обучения исполнительного уровня:  $f$  – окружающая среда (виды и объекты профессиональной деятельности выпускников, уровень современных средств автоматизации, ресурсы кафедры);  $e$  – показатели эффективности обучения;  $u$  – порядок выполнения работ;  $x$  – результаты текущего контроля успеваемости и аттестации студентов;  $g$  – основная профессиональная образовательная программа;  $y$  – компетенции (знания, умения, навыки)**

Обучатель включает преподавателя, реализующего современные образовательные технологии, и лабораторный обучающий комплекс. Обратная связь представляет собой процесс проверки знаний, умений, навыков преподавателем с помощью оценочных средств.

Процесс обучения с точки зрения теории управления является динамическим, недетерминированным, нестационарным и формируется в условиях постоянно изменяющейся среды. Он трудно поддается формальному описанию, знания о нем носят качественный характер. Ставится задача сформировать структуру лабораторного обучающего комплекса, определив его состав.

Усовершенствование лабораторной базы и ее организации предлагается вести по трем направлениям: создание универсальных стендов; разработка и внедрение виртуальных лабораторий; формирование баз данных по лабораторным работам.

### Стенды

Для того чтобы устройства автоматизации были удобны для изучения из них проектируют стенды [2,3]. Стоимость стендов, как правило, в несколько раз выше стоимости изучаемого оборудования. Поэтому предложено спроектировать стенды средствами кафедры [4–6].

К стендам сформулированы следующие требования:

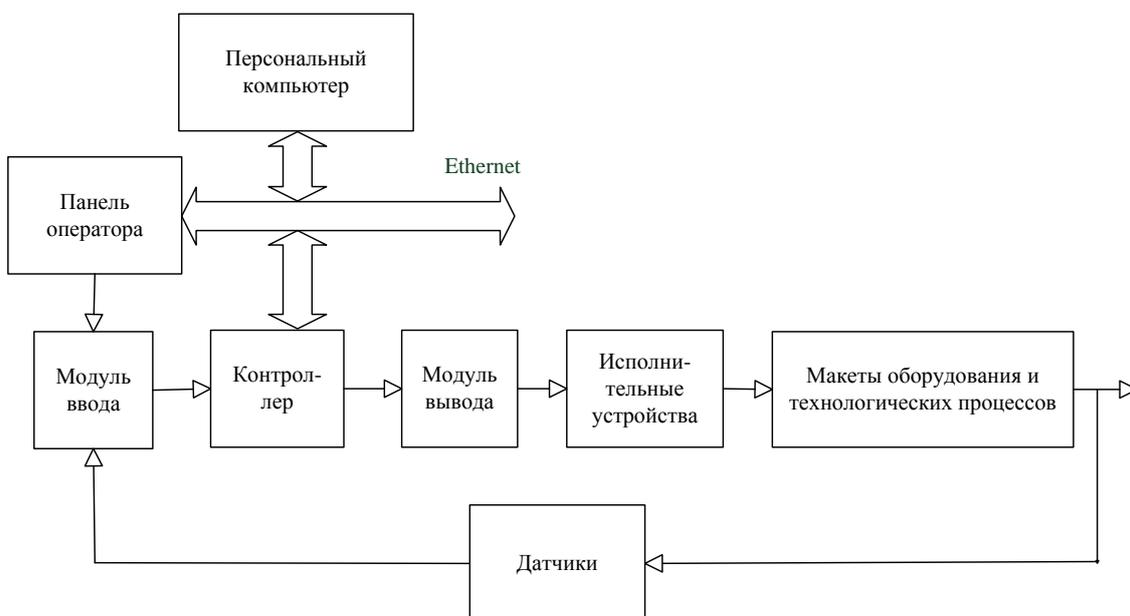
- в отличие от промышленных требований к оборудованию, основное требование к стендам – это не точность и не высокие мощности, а его многофункциональность;
- стенды должны быть безопасны в эксплуатации;
- стенды должны быть легко модернизируемыми и напоминать конструктор, позволяющий выбрать и подключить нужные средства автоматизации (датчики, модули ввода/вывода, программные средства) для решения задач автоматизации, поставленные преподавателем; указанная возможность стендов к комплектации развивает творческое мышление студентов;
- в условиях дефицита площадей стенд должен занимать рабочую площадь менее одного квадратного метра;

- стенды должны иметь основную часть, с помощью которой студенты могли бы отрабатывать свои умения и навыки, и демонстрационную часть для знакомства абитуриентов или студентов младших курсов со специальностью;
- стенды должны отрабатывать следующие основные задачи автоматизации: слежения, позиционирования, формирования траекторий, в том числе, координации движений; технического зрения; управления погрузкой, разгрузкой и складскими работами; проведения научных исследований в области моделирования и управления.

Планируется использовать стенды по дисциплинам, касающимся программно-технических средств автоматизации, синтеза регуляторов, обработки сигналов, моделирования, проектирования, эксплуатации, диагностики систем управления. Работа на стенде также должна показывать взаимосвязи и преемственность дисциплин. Применение стендов ограничено дисциплинами, касающимися методов и устройств управления, но они не предназначены для изучения технологического оборудования, технологических процессов, исполнительных устройств, например автоматизированного электропривода.

Использование стендов в учебном процессе позволяет студентам приобрести следующие навыки и умения согласно государственному образовательному стандарту и образовательной программе по направлению:

- обоснованного выбора программно-технических средств автоматизации;
- использования программно-технических средств для разработки систем оптимального, логического, адаптивного, робастного, согласованного, синергетического и другого вида управления;
- подключения (или монтажа) устройств автоматизации и работы с электрическим оборудованием;
- определения функций, алгоритмов работы, структуры (или архитектуры) системы автоматического управления;
- составления (идентификации) математических моделей процессов и объектов на основании полученных с помощью стенда экспериментальных данных;



**Рис. 2. Структурная схема стенда системы управления**

- реализации на программно-технических средствах методов и алгоритмов цифровой обработки сигналов;
- решения технических задач распознавания образов (или изображений) и обучения технических систем с применением контроллеров.

Стенды предложено проектировать по модульному принципу, а в качестве оборудования использовать макеты. Причем студентам самим предлагается собирать систему управления из комплектующих в соответствии с поставленной задачей. Обобщенная структурная схема системы управления приведена на *рис. 2*.

В качестве комплектующих механических конструкций использованы робототехнические конструкторы (например, LEGO Mindstorms Education EV3, Fischertechnik ROBO TX Automation Robots, робот Robo-PICA и др.).

Указанные конструкторы также включают широкий набор датчиков: инфракрасный, гироскопический, ультразвуковой, магнитный барометрический датчики, а также датчики касания, цвета, отражения, расстояния, угла наклона, ускорения (акселерометр), температуры, скорости вращения, расстояния, перемещения, освещенности, звука, движения, силы, компас, мультиплексор и другие.

В качестве исполнительных устройств использованы двигатели постоянного тока и серводвигатели тех же фирм.

Устройства управления реализованы на базе контроллеров, модулей ввода, вывода, частотных преобразователей фирм Allen-Bradley и ICP DAS [7].

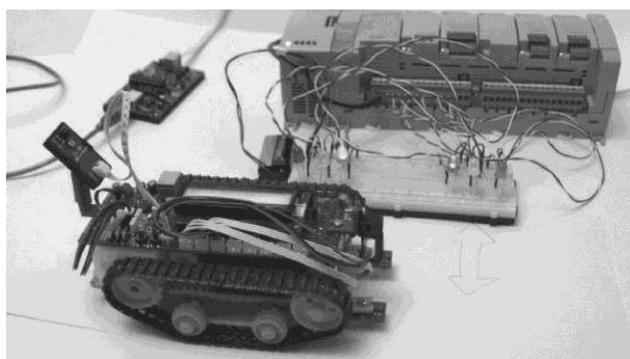
Связь с оператором осуществляется с помощью дисплеев, кнопок, светодиодов, а также с помощью персонального компьютера через локальную сеть Ethernet.

При создании распределенных систем управления может быть также использовано сетевое оборудование.

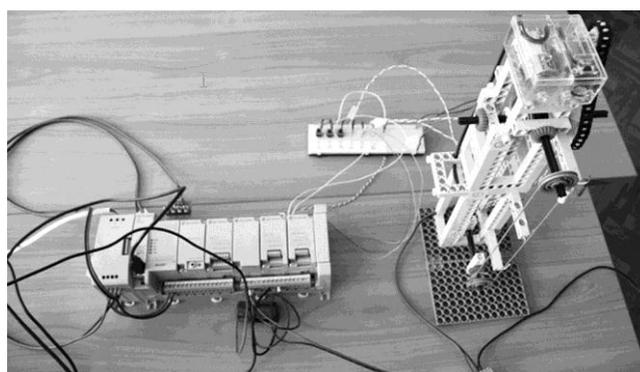
На *рис. 3* приведен пример системы управления регулированием и координацией движения транспортных средств в ГПС.

На *рис. 4* приведен другой пример системы управления лифтом трехэтажного здания. На базе этой же

конструкции реализована система управления автоматом сверления глубоких отверстий.



**Рис. 3. Фрагмент системы регулирования и координации движения транспортных средств**

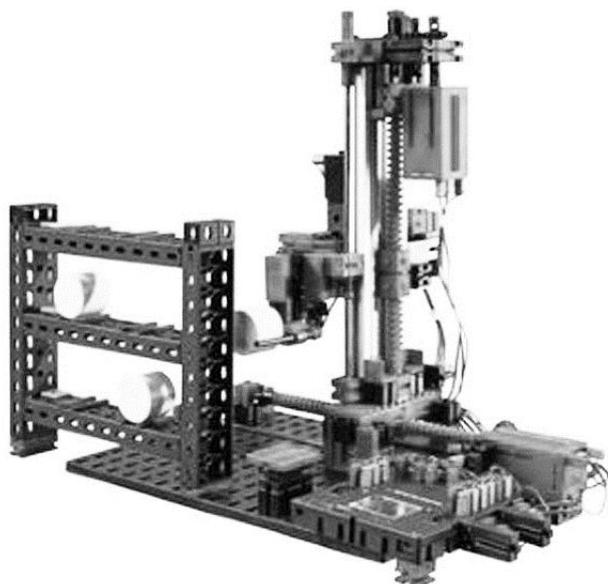


**Рис. 4. Система управления лифтом и автоматом сверления глубоких отверстий**

На *рис. 5* показан пример робота, выполняющего складские работы, погрузочно-разгрузочные и другие работы.

Традиционные стенды имеют «жесткую» («фиксированную») структуру. Предлагаемые стенды имеют переменную структуру, наделены свойствами адаптации и обладают способностями легко собираться и переком-

плектовываться обучающимися в зависимости от поставленной задачи. При этом обучающиеся, сами собирая стенд, делают обоснованный выбор средств автоматизации с применением теории принятия решений, развивая свои творческие способности.



**Рис. 5. Робот из конструктора Fischertechnik ROBO TX Automation Robots**

### **Виртуальные лаборатории**

Виртуальные лаборатории предполагают замену реального оборудования на видеоролики и графические изображения на персональном компьютере, а лабораторных экспериментов на численное и имитационное компьютерное моделирование. Виртуальные лаборатории востребованы по следующим причинам.

Многие изучаемые технические устройства (технологическое оборудование, летательные аппараты, устройства ЧПУ, контроллеры, исполнительные, измерительные и другие устройства) могут иметь большие габариты, высокие стоимости, могут присутствовать в лабораториях кафедры в единичном экземпляре или могут быть представлены только в технопарках и на предприятиях, куда студенты имеют ограниченный доступ. Также это оборудование может быть легко выведено из строя обучающимися. Поэтому актуальна замена изучаемых устройств макетами, видеофильмами, схемами, фотографиями или имитационным моделированием.

Требуется демонстрировать эксперименты, которые невозможно поставить в реальных производственных условиях. Актуальна их замена компьютерными экспериментами.

Чтобы пробудить у студентов интерес к учебе, упростить понимание материала за счет его наглядности, сформировать творческое отношение к задачам автоматизации, а также облегчить адаптацию к профессиональной деятельности в первые месяцы работы по специальности, необходима визуализация изучаемого материала.

Кроме того, многие лекции, практические и лабораторные занятия сопровождаются большими объемами иллюстративного материала. Это касается обзорных

занятий, а также занятий, на которых формируется умение последовательности профессиональных действий. Например, изучаются пошаговые этапы сборки узлов и изделий, последовательность монтажа электрического оборудования, этапы диагностики оборудования, планирование цехов, ход технологических процессов, формирование алгоритмов программ или написание самих программ. Объемы таких иллюстраций для одного занятия могут достигать 30–50 страниц. Поэтому процесс их подготовки и проведения требует новых технических средств и технологий обучения.

В настоящее время в учебный процесс происходит интенсивное внедрение интерактивных образовательных технологий: дополнительно к классическим лекциям используются лекции-визуализации, проблемные лекции, лекции дискуссии, лекции пресс-конференции, case study. В таких ситуациях без визуализации работы современных систем автоматизации нельзя обойтись.

Виртуальная лаборатория организована для локального использования и в сетевых вариантах с применением локальной сети Ethernet, глобальной сети Internet.

В качестве инструментальных средств создания виртуальных лабораторий очевидно использовать программные инструментальные средства систем автоматизации [8–12], например Matlab, LabView, SCADA-систему Trace Mode, среду программирования контроллеров ISaGRAF.

Matlab представляет комплекс математических средств для автоматического расчета, моделирования, анализа и синтеза систем автоматизации и управления. Matlab является идеальным инструментарием для абстрагирования (формализации) систем и процессов.

ISaGRAF, как и Trace Mode, включает средства программирования, поддерживающие языки стандарта IEC 61131-3 и модель распределенной системы по стандарту IEC 61499. Также среда ISaGRAF содержит программный отладчик, позволяющий имитировать контроллер на персональном компьютере и моделировать работу программы без установки на контроллере.

LabView содержит инструменты для сбора и обработки измерительной информации, позволяет создавать виртуальные приборы, также имеет средства программирования.

Trace Mode предоставляет возможности:

- формировать имитаторы в виде математических моделей объектов автоматизации и управления, применяемые для первоначальной проверки алгоритмов управления и отладки программного обеспечения систем управления;
- создавать пульта операторов и виртуальные приборы, необходимые для мониторинга технологических процессов и оборудования;
- формировать мнемосхемы, используемые операторами и диспетчерами, контролирующими технологические процессы;
- организовывать связь с базами данных для архивирования информации.

Эти же возможности можно использовать для создания виртуальных лабораторий.

В сетевом варианте при дистанционном обучении для визуальной связи, обеспечения возможности on-line

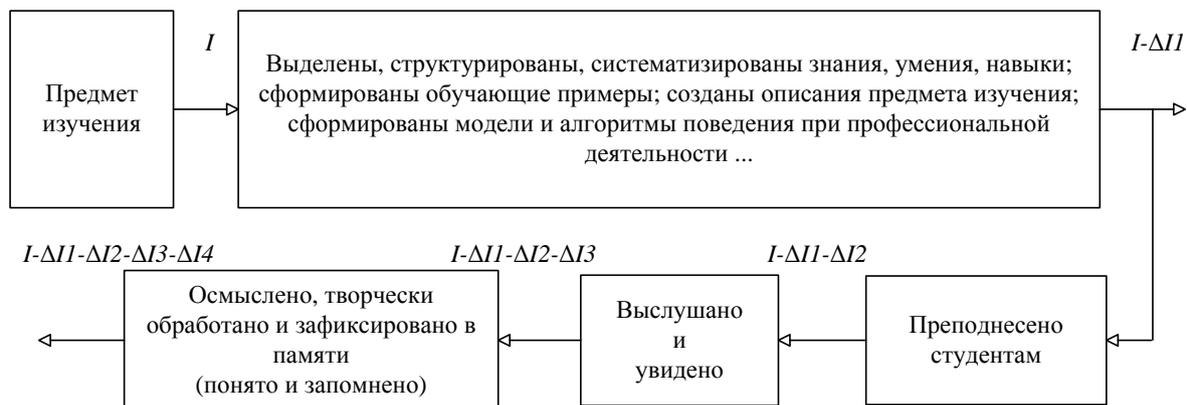


Рис. 8. Схема передачи информации

консультаций и методической поддержки предполагается использовать СДО «Mіgarolis».

Кроме того, при создании сетевого раздела виртуальной лаборатории использованы возможности OPC технологий, связанные с обменом данными. В качестве серверов могут выступать удаленно расположенные контроллеры, датчики, исполнительные устройства, а в качестве клиентов – MATLAB, Trace Mode и другое программное обеспечение, установленное на персональных компьютерах в лабораториях кафедры. Например, построив модель регулятора в Simulink, нет необходимости переводить ее на язык программирования контроллеров, а с помощью OPC сервера можно напрямую переслать управляющий сигнал на исполнительное устройство. Однако основным препятствием здесь являются ограничения по быстродействию такой связи.

Виртуальная лаборатория имеет ряд разделов, оформленных в виде «библиотек», представленных на рис. 6.

Виртуальные лаборатории разработаны на базе сочетания универсальных информационных технологий и специализированных информационных технологий систем автоматизации. Определенные разделы виртуальных лабораторий могут быть разработаны самими студентами в ходе лабораторных работ как имитаторы систем управления технологическими процессами.

#### База данных лабораторных работ

С целью систематизации, непрерывного накопления и тиражирования материалов занятий по средствам автоматизации предложено формирование электронной базы данных лабораторных работ. Составлена информационная модель базы данных на языке IDEF1, приведенная на рис. 7.

Источниками информации при составлении такой базы могут быть документация на применяемые программно-технические средства автоматизации, материалы производственных практик и дипломных проектов, информация рекламного характера, размещаемая в сети Internet, учебно-методические комплексы.

База данных может рассматриваться как структурированное описание материально-технического обеспечения кафедры для различных дисциплин и предлагает альтернативные варианты и комплекты средств автоматизации для конкретных лабораторных работ.

#### Оценка эффективности применения лабораторного обучающего комплекса

Обучение можно рассматривать как процесс получения и освоения обучающимися информации. Для оценки информации выбрана характеристика, независимая от ее формы представления и физического содержания, – количество информации.

Схема передачи информации от предмета обучения к обучающемуся приведена на рис. 8. Этот процесс всегда связан с потерей информации на каждом этапе.

$I=100\%$  – полная информация о предмете изучения.

$\Delta I1$  – потери информации, связанные с сужением поля знаний и с представлением информации. При подготовке к занятиям преподаватель преднамеренно в учебных целях упрощает представление о предмете изучения, исключая некоторые части аспектов знаний. Часть знаний может оказаться недоступной для преподавателя. Также не вся информация может обрести словесную, математическую, схематическую и другие формы представления. А выбранная форма представления материала может оказаться слишком сложной для восприятия. По экспертным оценкам потери информации могут составлять  $\Delta I1=20-50\%$ .

$\Delta I2$  – потери информации, связанные с проблемами преподавания информации. Не вся запланированная информация может быть высказана и представлена студентам из-за дефицита времени или избыточности излагаемого материала или недостаточных способностей студентов.  $\Delta I2=10-20\%$ .

$\Delta I3$  – потери информации, связанные с неполной фиксацией преподаваемого преподавателем материала. Студенты могут проявить недостаточную концентрацию внимания и заинтересованность.  $\Delta I3=15-20\%$ .

$\Delta I4$  – потери информации, связанные с неполным пониманием и запоминанием изучаемых в дисциплине вопросов.  $\Delta I4=5-30\%$ .

В итоге суммарные потери количества информации по экспертным оценкам зачастую достигают более 75%.

Таким образом, минимизация потерь количества информации о предмете изучения может рассматриваться как интегральный критерий эффективности процесса обучения.

Оценка эффективности обучающего лабораторного комплекса выполнялась экспериментально с помощью экспертов-преподавателей в ходе проведения занятий по дисциплинам: «Математические основы дискретно-логических систем» (1 курс), «Средства автоматизации и управления» (3 курс), «Программное обеспечение систем управления» (4 курс).

Показатели эффективности оценивались экспертами по десятибалльной шкале. В результате чего уровень заинтересованности студентов и, следовательно, концентрации внимания студентов возросли с 4 баллов до 9 баллов (снижился  $\Delta I3$ ); улучшение понимания изучаемых вопросов и упрощение овладения компетенциями за счет наглядности, визуализации и развития творческих способностей студентов изменилось с 6 баллов до 9 баллов (снижился  $\Delta I4$ ); расширение области обзора устройств автоматизации в связи с бурным развитием информационных и сетевых технологий изменилось с 3 баллов до 7 баллов (снизились  $\Delta I1$  и  $\Delta I2$ ). А суммарные потери количества информации о предмете изучения снизились в среднем на 20 %.

### Заключение

Предложена новая структура лабораторного обучающего комплекса, включающая перенастраиваемые стенды, виртуальные лаборатории и базу данных по лабораторным работам, взаимодействующие с помощью компьютерных сетей.

Новизна лабораторного обучающего комплекса состоит:

- в наделении свойствами адаптации стендов лабораторного обучающего комплекса;
- в применении универсальных информационных технологий и специализированных информационных технологий систем автоматизации при проектировании и функционировании лабораторного обучающего комплекса;
- в применении средств автоматизации технических объектов для автоматизации учебного процесса как части социальной системы.

Внедрение предложенных мероприятий в учебный процесс уже на первых шагах показало повышение эффективности обучения студентов, а также облегчило реализацию компетентностного подхода в учебном процессе.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Степанова О.М., Козлова Н.В., Крючков Ю.Ю., Соловьев М.А. Внедрение проблемно-ориентированных технологий в практику обучения студентов технических ВУЗов // Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – Томск: Изд-во Национальный исследовательский Томский политехн. ун-т. Том 309. №1. 2006. С. 242-246.
2. Шпонько А.А., Линьков С.А. Учебный лабораторный стенд по исследованию мехатронной системы с шаговым электроприводом // Автоматизированные технологии и производства. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-т. 2013. Вып. 5. С.80-84.

3. Рыбалев А.Н., Редозубов Р.Д., Колесников П.С. Модернизация лабораторного стенда по дисциплине «автоматизация технологических процессов и производств» // Вестник амурского государственного университета. серия: естественные и экономические науки. – Благовещенск: Изд-во Амурский гос. ун-т. №43. 2008 С. 50-54.
4. Гончарова С. Г., Месягутов И. Ф., Ахметшина Г. Н., Баранова К.М. Экспертная система для поддержки принятия решений при проектировании систем управления // Автоматизированные технологии и производства. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-т. 2014. Вып. 6. С.58-62.
5. Зориктуев В.Ц., Новиков В.Н. Система поддержки принятия решений при организационно-технологическом проектировании с использованием онтологий // Автоматизированные технологии и производства. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-т. 2015. Вып. 7. С. 46-49.
6. Zoriktuev V.Ts., Goncharova S.G., Mesyagutov I.F. Representation and Derivation of Knowledge in the Control Systems of Mechatronic Machine-Tool Systems/ Russian Engineering Research. Vol. 28, No. 2, 2008. pp. 177–182.
7. Гончарова С. Г., Месягутов И. Ф. Разработка программного обеспечения систем автоматизации на базе программируемых контроллеров Allen-Bradley. Уфа: УГАТУ, 2014. 93 с.
8. Денисенко В. В. Компьютерное управление технологическим процессом. М.: Горячая линия – Телеком, 2013. 606 с.
9. Севастьянов Б. Г. Проектирование микропроцессорных систем управления. Волгоград: ВолгГТУ, 2009. 256 с.
10. Грушвицкий Р. И., Мурсаев А. Х., Угрюмов Е. П. Проектирование систем на микросхемах с программируемой структурой. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 736 с.
11. Васильев А. Е. Микроконтроллеры. Разработка встраиваемых приложений. СПб.: БХВ-Петербург, 2008. 304 с.
12. Парк Дж., Маккей С., Райт Э. Передача данных в системах контроля и управления: практическое руководство. М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. 480 с.

# DESIGNING AND INTRODUCTION OF LABORATORY TRAINING COMPLEX FOR AUTOMATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES SPECIALIZATION

A.G. Lyutov<sup>1</sup>, S.G. Goncharova<sup>2</sup>, V.G. Kryuchkov<sup>3</sup>, I.F. Mesyagutov<sup>4</sup>  
<sup>1,2,3,4</sup> Ufa state aviation technical university, Ufa, Russia

**Abstract.** Three possible ways of improvement of laboratory base and its organization for the "Automation of Technological Processes and Productions" specialization are offered: creation of universal stands by using of modular principle of design; development and deployment of virtual laboratories; creation of laboratory works databases. These activities allow to increase the efficiency of educational process in conditions of continuous modernization of automation equipment in conditions of introduction of automation to various spheres of national industry and also facilitate realization of competence-based approach in educational process.

**Keywords:** automation and control systems; laboratory stands; virtual laboratories.

## REFERENCES

1. Stepanova O.M., Kozlova N.V., Kryuchkov Yu.Yu., Soloviev M.A. Introduction of problem oriented technologies into the educational process in technical universities [Vnedrenie problemno-orientirovannykh tekhnologiy v praktiku obucheniya studentov tekhnicheskikh VUZov]. *Proceedings of Tomsk polytechnic university. Engineering of geo resources [Izvestiya tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov]*. Tomsk. National research Tomsk polytechnic university. vol. 309. №1. 2006. pp. 242-246.
2. Shpon'ko A.A., Lin'kov S.A. Training laboratory stand for research of mechatronic system with stepper drive [Uchebnyy laboratornyy stend po issledovaniyu mekhatronnoy sistemy s shagovym elektroprivodom]. *Automation of technologies and production [Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva]*. Magnitogorsk. Magnitogorsk state technical university. 2013. vol. 5, pp. 80–84.
3. Rybalev A.N., Redozubov R.D., Kolesnikov P.S. Modernization of laboratory stand for «automation of technological processes and productions» course [Modernizatsiya laboratornogo stenda po distsipline «avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov i proizvodstv»]. *Proceedings of Amur state university: natural and economical sciences series [Vestnik amurskogo gosudarstvennogo universiteta. seriya: estestvennye i ekonomicheskije nauki]*. Blagoveshchensk. Amur state university . №43. 2008. pp. 50-54.
4. Goncharova S.G., Mesyagutov I.F., Ahmetshina G.N., Baranova K.M. Expert system for decision making in control systems engineering [Ekspertnaya sistema dlya podderzhki prinyatiya resheniy pri proektirovanii sistem upravleniya]. *Automation of technologies and production [Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva]*. Magnitogorsk. Magnitogorsk state technical university. 2014. vol. 6, pp. 58–62.
5. Zoriktuev V.Ts., Novikov V.N. Decision making system in organization-technological designing on the base of ontologies [Sistema podderzhki prinyatiya resheniy pri organizatsionno-tekhnologicheskoy proektirovanii s ispol'zovaniem ontologii]. *Automation of technologies and production [Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva]*. Magnitogorsk. Magnitogorsk state technical university. 2015. vol. 7, pp. 46–49.
6. Zoriktuev V.Ts., Goncharova S.G., Mesyagutov I.F. Representation and Derivation of Knowledge in the Control Systems of Mechatronic Machine-Tool Systems/ *Russian Engineering Research*. Vol. 28, No. 2, 2008. pp. 177–182.
7. Goncharova S.G., Mesyagutov I.F., Software Development for Automation Systems on the base of Allen-Bradley PLC [Razrabotka programmnoy obespecheniya sistem avtomatizatsii na baze programmiruemyykh kontrollerov Allen-Bradley]. Ufa: USATU, 2014. 93 p.
8. Denisenko V.V., Computer control of technological process [Komp'yuternoe upravlenie tekhnologicheskim protsessom]. Moscow: Hot Line – Telecom, 2013. 606 p.
9. Sevastyanov B.G., Microprocessor control system design [Proektirovanie mikroprotsessornykh sistem upravleniya]. Volgograd: VolgSTU, 2009. 256 p.
10. Grushvitskiy R.I., Mursaev A.H., Ugryumov E.P., System Designing on the base of programmable structure microcircuits [Proektirovanie sistem na mikroskhemakh s programmiruemoy strukturoy]. Saint-Petersburg: BHV-Petersburg, 2006. 736 p.
11. Vasilyev A.E., Microcontrollers. Programming of embedded applications [Razrabotka vstraivaemykh prilozheniy]. Saint-Petersburg: BHV-Petersburg, 2008. 304 p.
12. John Park, Steve Mackay, Edwin Wright, Practical data communications for Instrumentation and Control [Peredacha dannykh v sistemakh kontrolya i upravleniya: prakticheskoe rukovodstvo]. Moscow: «IDT-Group» LTD, 2007. 480 p.

УДК 621.3.07, 681.5.015

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МОТОРНОГО ВАГОНА С УЧЕТОМ ДИССИПАТИВНЫХ СИЛ

В.И. Носков<sup>1</sup>, А.Ю. Заковоротный<sup>2</sup>, Н.В. Мезенцев<sup>3</sup>, Г.В. Гейко<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина

arcade@i.ua

**Аннотация.** Разработана математическая модель электромеханической системы моторного вагона с тяговым асинхронным электроприводом, которая учитывает реализацию момента вращения тягового электродвигателя с упругими связями механической системы при взаимодействии колесных пар с рельсами. Модель позволяет на стадии проектирования определять границы устойчивой работы привода, исследовать качественные показатели системы регулирования, синтезировать структуру корректирующих звеньев при заданных критериях качества.

**Ключевые слова:** математическая модель, электромеханическая система, тяговый асинхронный электропривод, упругие связи, колесная пара.

### Постановка проблемы и анализ литературы

При создании нового и совершенствовании существующего тягового подвижного состава актуальной является задача разработки эффективной системы управления. Это, в свою очередь, требует создания соответствующей математической модели электромеханической системы моторного вагона с тяговым асинхронным электроприводом, которая учитывала бы реализацию момента вращения тягового электродвигателя с упругими связями механической системы при взаимодействии колесных пар с рельсами.

Проблеме синтеза математических моделей электромеханической системы электропривода переменного тока с учетом упругих связей посвящено множество работ [1 – 8], однако вопросы, связанные с моделированием процессов, которые возникают при взаимодействии колесных пар с рельсами, а также учитывающими упругие связи в элементах электромеханической системы, рассмотрены недостаточно полно.

Целью статьи является создание и исследование математической модели электромеханической системы дизель-поезда ДЭЛ-02 с тяговым асинхронным электроприводом с учетом упругих связей в его элементах и взаимодействия колесных пар с рельсами, которая позволит осуществлять синтез системы регулирования тяговым электроприводом.

Упрощенная структурная схема электромеханической системы дизель-поезда приведена на рис. 1. Здесь приняты следующие условные обозначения:  $M_{эл}$  – вращающий момент ротора тягового асинхронного двигателя, воздействующий на колеса моторного вагона через шестерню, редуктор, полый вал, соединительную муфту и вал колесной пары;  $J_1$  – момент инерции ротора тягового двигателя, шестерни, зубчатого колеса,

редуктора и полого вала;  $R_1$  – сосредоточенная материальная точка, включающая в себя ротор тягового двигателя, шестерню, зубчатое колесо редуктора и полый вал;  $J_2$  – момент инерции колесной пары;  $R_2$  – сосредоточенная материальная точка, включающая в себя колесную пару;  $C$  – эквивалентная упругость, учитывающая упругость звеньев рассматриваемой электромеханической системы моторного вагона;  $M_{сц}$  – момент сцепления колесной пары с рельсом.

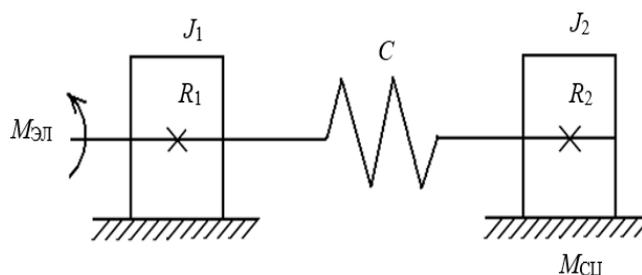


Рис. 1. Структурная схема электромеханической системы моторного вагона

Как видно из рис. 1 связь тягового асинхронного двигателя с колесной парой дизель-поезда, в общем случае является упругой за счет конечной жёсткости валов редуктора и колесной пары, зубьев шестерни и зубчатого колеса редуктора, упругости соединительных кордовых муфт.

Двухмассовая модель электромеханической системы моторного вагона, приведенная на рис. 1, может быть описана следующей системой обыкновенных дифференциальных уравнений третьего порядка [7, 8]:

$$\frac{dw_1}{dt} = \frac{1}{J_{1д}} (iM_{эл} - k(U_{\delta}, V_t)\Psi_0 \Pi_k R_k);$$

$$\frac{dw_2}{dt} = \frac{1}{J_{2д}} (c(w_1 - w_2) + b(\phi_1 - \phi_2) - k(U_\delta, V_t)\Psi_0\Pi_k R_k); \quad (1)$$

$$\frac{d(\phi_1 - \phi_2)}{dt} = w_1 - w_2,$$

где  $w_1, w_2$  – угловые скорости шестерни и колесной пары;  $J_{1д}$  – моменты инерции ротора тягового двигателя, шестерни, редуктора, полого вала, приведенные к оси колесной пары;  $M_{эл}$  – электромагнитный момент тягового двигателя;  $i$  – передаточное число редуктора;  $k(U_\delta, V_t)$  – нелинейный коэффициент, зависящий от скорости буксования  $U_\delta$  и скорости дизель-поезда  $V_t$ ;  $\Psi_0$  – потенциальное значение коэффициента сцепления колесной пары с рельсом;  $\Pi_k$  – текущее значение сцепного веса колесной пары;  $R_k$  – радиус колес колесной пары;  $\phi_1, \phi_2$  – углы поворота шестерни и колесной пары;  $J_{2д}$  – момент инерции колесной пары;  $c$  – жесткость упругой связи в двухмассовой системе;  $b$  – коэффициент рассеивания энергии колебаний упругой связи двухмассовой системы;  $k(U_\delta, V_t)\Psi_0\Pi_k R_k = M_{сц}$  – момент сцепления колесной пары с рельсом.

Анализ математической модели (1) электромеханической системы показывает, что из-за наличия в механической системе привода кордовой муфты, предназначенной демпфировать колебания подрессоренных частей кузова моторного вагона, не допуская их воздействия на колесную пару, возможно возникновение резонансных явлений в электромеханической системе тяговый асинхронный двигатель – колесная пара. Аналитическое исследование резонансных явлений в модели (1) с целью определения резонансной частоты и разработки корректирующих звеньев, подавляющих эти резонансные колебания в электроприводе, практически невозможно из-за нелинейности системы дифференциальных уравнений. В связи с этим целесообразна линеаризация системы уравнений (1) с последующим использованием аналитических методов исследования применительно к линейной математической модели.

Для максимального использования сцепной массы моторного вагона на отечественном дизель-поезде ДЭЛ-02 реализовано индивидуальное управление тяговыми двигателями. Поэтому разработана линеаризованная модель электропривода с одним тяговым асинхронным двигателем. Модель также содержит механическую систему привода с кордовой муфтой, регуляторы САР и нагрузки, приведенные к одному двигателю, определены передаточные функции элементов линейной системы.

При разработке линейной математической модели электропривода для аналитического исследования статических и динамических режимов работы системы преобразователь – тяговый двигатель – механическая система использован метод огибающей, предложенный А.А. Булгаковым. При этом для уравнений асинхронного двигателя используется система ортогональных осей  $X, Y$ , вращающаяся синхронно с результирующим вектором напряжения статора [9].

Система обыкновенных дифференциальных уравнений тягового асинхронного двигателя во вращающейся

ортогональной системе координат  $X, Y, 0$  записывается относительно потокосцеплений  $\Psi_{X1}, \Psi_{Y1}, \Psi_{X2}, \Psi_{Y2}$  соответственно обмоток статора и ротора двигателя по осям  $X, Y$  и имеет следующий вид [10 – 13]:

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_{X1}}{dt} &= u_{X1} - a_S \Psi_{X1} + a_S k_R \Psi_{X2} + \Omega_0 \Psi_{Y1}; \\ \frac{d\Psi_{Y1}}{dt} &= u_{Y1} - a_S \Psi_{Y1} + a_S k_R \Psi_{Y2} + \Omega_0 \Psi_{X1}; \\ \frac{d\Psi_{X2}}{dt} &= -a_R \Psi_{X2} + a_S k_R \Psi_{X1} + (\Omega_0 - \Omega) \Psi_{Y2}; \\ \frac{d\Psi_{Y2}}{dt} &= -a_R \Psi_{Y2} + a_S k_R \Psi_{Y1} + (\Omega_0 - \Omega) \Psi_{X2}; \\ M &= \frac{3}{2} p \frac{k_R}{\sigma L_S} (\Psi_{X2} \Psi_{Y1} - \Psi_{X1} \Psi_{Y2}); \\ \frac{d\Omega}{dt} &= \frac{p}{J} (M - M_c), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $u_{X1}, u_{Y1}$  – напряжения по осям  $X, Y$  на статоре двигателя;  $a_S, a_R$  – коэффициенты затухания,  $a_S = 1/\sigma T_S$ ,  $a_R = 1/\sigma T_R$ ;  $\sigma = 1 - k_S k_R = 1 - L_M^2 / L_S L_R$  – полный коэффициент рассеяния;  $k_S, k_R$  – коэффициенты электромагнитной связи соответственно статора и ротора,  $k_S = L_M / L_S$ ,  $k_R = L_M / L_R$ ;  $L_M, L_S, L_R$  – соответственно индуктивность контура намагничивания (взаимная индуктивность), полные индуктивности статора и ротора,  $L_S = L_M + L_1$ ,  $L_R = L_M + L_2$ ;  $L_1, L_2$  – соответственно индуктивность рассеивания статора и ротора;  $T_S = L_S / r_1$  – электромагнитная постоянная времени статора;  $T_R = L_R / r_2$  – электромагнитная постоянная времени ротора;  $\Omega_0$  – угловая частота напряжения статора двигателя при  $p = 1$ ;  $\Omega$  – электрическая угловая частота вращения ротора двигателя;  $J$  – момент инерции двигателя и механизма, приведенный к валу двигателя;  $M$  – электромагнитный момент АД;  $M_c = M_c(\Omega)$  – момент сопротивления нагрузки, в общем случае зависит от скорости.

Для случая синусоидального напряжения на статоре двигателя напряжения по осям (функции воздействия) определяются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} u_{X1} &= U_M \cos((\Omega_0 - \Omega_K)t + \Phi_K); \\ u_{Y1} &= U_M \sin((\Omega_0 - \Omega_K)t + \Phi_K), \end{aligned}$$

где  $U_M$  – амплитуда первой гармоники фазного напряжения на статоре двигателя;  $\Omega_K$  – угловая скорость вращения осей координат;  $\Phi_K$  – произвольная начальная фаза напряжения обмотки статора [9, 10].

В случае синхронной системы координат  $\Omega_0 = \Omega_K$ , выбирая начальную фазу напряжения  $\Phi_K = 0$ , получим:  $u_{X1} = U_M$ ;  $u_{Y1} = 0$ , то есть постоянное напряжение, равное  $U_M$ , по оси  $X$  и нулевое напряжение по оси  $Y$ .

Для последующих вычислений систему уравнений (2) удобно записать в виде:

$$\frac{dx_1}{dt} = u_1 - a_1 x_1 + a_2 x_2 + \omega_0 y_1; \quad (3)$$

$$\frac{dy_1}{dt} = u_2 - a_1 y_1 + a_2 y_2 + \omega_0 x_1; \quad (4)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = -a_3 x_2 + a_2 x_1 + \Delta S y_2; \quad (5)$$

$$\frac{dy_2}{dt} = -a_3 y_2 + a_2 y_1 + \Delta S x_2; \quad (6)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = a_4 (M - M_c); \quad (7)$$

$$M = a_5 (x_2 y_1 - x_1 y_2), \quad (8)$$

где  $x_1 = \Psi_{x1}$ ;  $y_1 = \Psi_{y1}$ ;  $x_2 = \Psi_{x2}$ ;  $y_2 = \Psi_{y2}$ ;

$$a_1 = a_s; a_2 = a_s k_R; a_3 = a_R; a_4 = p/J; a_5 = \frac{3}{2} p \frac{k_R}{\sigma L_S};$$

$\Delta S = \Omega_0 - \Omega$  – абсолютная величина скольжения.

Для исследования вопросов устойчивости модели (3) – (8) в определенной рабочей точке ( $u_1 = u_1^0$ ,  $u_2 = u_2^0$ ,  $\omega_0 = \omega_0^0$ ,  $\Delta S = \Delta S^0$ ) представим ее в виде передаточных функций. Из уравнений (3) – (6) после несложных преобразований нетрудно получить в операторной форме выражения для потокосцеплений:

$$x_1(p) = \frac{a_1(1+pT_1)(u_1^0 + a_2 x_2(p)) + \omega_0^0(u_2^0 + a_2 y_2(p))}{a_1^2(1+pT_1)^2 - \omega_0^2} + \frac{\omega_0^0(u_2^0 + a_2 y_2(p))}{a_1^2(1+pT_1)^2 - \omega_0^2}; \quad (9)$$

$$y_1(p) = \frac{a_1(1+pT_1)(u_2^0 + a_2 y_2(p)) + \omega_0^0(u_1^0 + a_2 x_2(p))}{a_1^2(1+pT_1)^2 - \omega_0^2} + \frac{\omega_0^0(u_1^0 + a_2 x_2(p))}{a_1^2(1+pT_1)^2 - \omega_0^2}; \quad (10)$$

$$x_2(p) = \frac{a_2 a_3 (1+pT_2) x_1(p)}{a_3^2(1+pT_2)^2 - (\Delta S^0)^2} + \frac{a_2 \Delta S^0 y_1(p)}{a_3^2(1+pT_2)^2 - (\Delta S^0)^2}; \quad (11)$$

$$y_2(p) = \frac{a_2 a_3 (1+pT_2) y_1(p)}{a_3^2(1+pT_2)^2 - (\Delta S^0)^2} + \frac{a_2 \Delta S^0 x_1(p)}{a_3^2(1+pT_2)^2 - (\Delta S^0)^2}, \quad (12)$$

где  $T_1, T_2$  – постоянные времени;  $T_1 = \frac{1}{a_1}$ ;  $T_2 = \frac{1}{a_2}$ .

Для установления связи между входными и выходными переменными из соотношений (9) – (12) получены следующие двумерные передаточные функции  $W_1(p), W_2(p)$  для описания асинхронного тягового двигателя:

$$W_1(p) = \begin{vmatrix} a_1(1+pT_1) & \omega_0^0 \\ B(p) & B(p) \\ \omega_0^0 & a_1(1+pT_1) \\ B(p) & B(p) \end{vmatrix}; \quad (13)$$

$$W_2(p) = \begin{vmatrix} a_2 a_3 (1+pT_2) & a_2 \\ D(p) & D(p) \\ a_2 & a_2 a_3 (1+pT_2) \\ D(p) & D(p) \end{vmatrix}, \quad (14)$$

где

$$B(p) = a_1^2(1+pT_1)^2 - (\omega_0^0)^2; D(p) = a_3^2(1+pT_2)^2 - (\Delta S^0)^2.$$

Для двумерной передаточной функции  $W_1(p)$  входными переменными являются  $x_2(p)$  и  $y_2(p)$ , а выходными –  $x_1(p)$  и  $y_1(p)$ . Для двумерной передаточной функции  $W_2(p)$  входными переменными являются

$x_1(p)$  и  $y_1(p)$ , а выходными –  $x_2(p)$  и  $y_2(p)$ .

Для аналитических исследований нелинейное уравнение (8) необходимо линеаризовать в заданной рабочей точке ( $u_1 = u_1^0$ ,  $u_2 = u_2^0$ ,  $\omega_0 = \omega_0^0$ ,  $\Delta S = \Delta S^0$ ), используя характеристики тягового двигателя и соответствующие рабочей точке потокосцепления  $x_1^0, y_1^0, x_2^0, y_2^0$ .

Передаточные функции  $W_1(p), W_2(p)$  в своей структуре содержат колебательные звенья, описываемые соотношениями:

$$B(p) = a_1^2(1+pT_1)^2 - (\omega_0^0)^2;$$

$$D(p) = a_3^2(1+pT_2)^2 - (\Delta S^0)^2,$$

что при определенном соотношении параметров двигателя и электромеханической системы в заданной рабочей точке может приводить к неустойчивой работе тягового привода.

Для более точного описания процессов в заданной рабочей точке необходимо учитывать и двухмассовую модель электромеханической системы моторного вагона (1). В первом приближении в рабочей точке она может быть описана передаточной функцией  $W_3(p)$ , устанавливающей связь между скоростью вращения ротора тягового двигателя и электромагнитным моментом, являющимся функцией потокосцеплений  $x_1, y_1, x_2, y_2$ :

$$W_3(p) = \frac{pT_3 + 1}{pT_4(p^2T_5^2 + pT_3 + 1)}, \quad (15)$$

где  $T_3 = b/c$ ;  $c$  – жесткость упругой связи в двухмассовой системе;  $b$  – коэффициент рассеивания энергии колебаний упругой связи двухмассовой системы;  $T_4 = J_{1д} + J_{2д}$ ;  $J_{1д}$  – моменты инерции ротора тягового двигателя, шестерни, редуктора, полого вала, приведенные к оси колесной пары;  $J_{2д}$  – момент инерции колесной пары;

$$T_5 = \frac{J_{1д} J_{2д}}{c(J_{1д} + J_{2д})}.$$

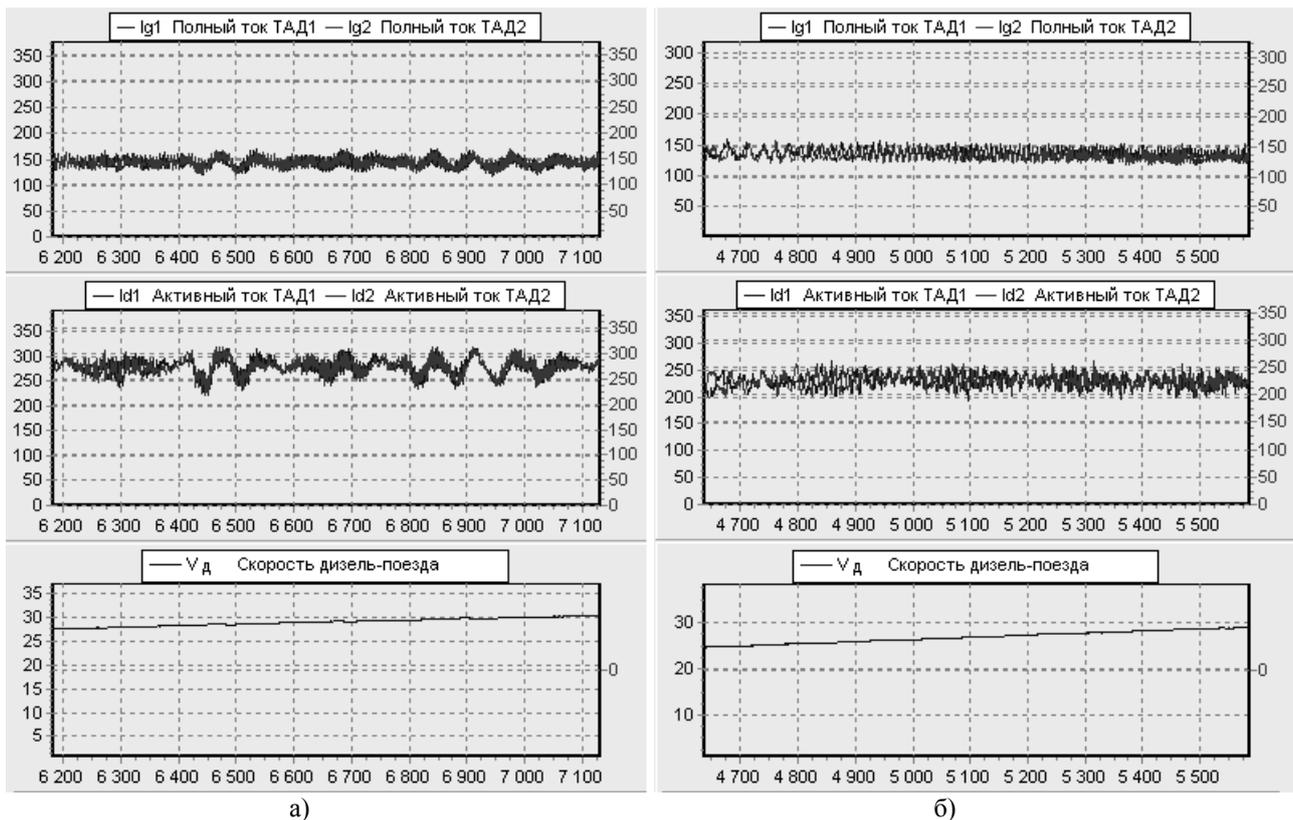
С использованием передаточных функций  $W_1(p), W_2(p)$  и  $W_3(p)$  разработана упрощенная структурная схема линеаризованной системы электропривода. Модель включает также передаточные функции, описывающие движение объекта управления, работу датчиков тока и потока ТАД:

$$W_4(p) = \frac{K_1}{1+pT_6};$$

$$W_5(p) = \frac{K_2}{1+pT_7};$$

$$W_6(p) = \frac{K_3}{1+pT_8},$$

где  $K_1, T_6$  – коэффициент и постоянная времени, зависящие от массы объекта управления и скорости его движения;  $K_2, K_3$  – постоянные коэффициенты, определяемые соответственно из характеристик датчиков тока и потока;  $T_6, T_7$  – постоянные времени датчиков тока и потока.



**Рис. 2. Осциллограммы процессов в электроприводе дизель-поезда ДЭЛ-02:**  
**а – без корректирующих устройств; б – при наличии корректирующих устройств**

Аналитические исследования электромеханической системы моторного вагона, проведенные на этапе проектирования, показали вероятность возникновения резонансных колебаний на частотах 25 – 30 Гц питающего тяговые асинхронные двигатели напряжения, что и подтвердили наладочные испытания дизель-поезда ДЭЛ-02 (рис. 2, а). На осциллограммах приведены изменения во времени (100 единиц по оси абсцисс осциллограммы соответствует одной секунде) полных и активных токов двух тяговых двигателей дизель-поезда и его скорости. Анализ осциллограмм приведенных на рис. 2, а показывает, что при скоростях движения дизель-поезда 27 – 30 км/час, возникают существенные колебания активных и полных токов обоих тяговых двигателей с частотой этих колебаний примерно равных 1,2 Гц, а при наличии корректирующих устройств таких колебаний не наблюдается (рис. 2, б).

### Выводы

Разработана линейная математическая модель на основе одного эквивалентного тягового асинхронного двигателя и упругой механической системы электропривода дизель-поезда ДЭЛ-02, которая позволяет на стадии проектирования определять границы устойчивости в заданной области функционирования системы при определенных параметрах электрической и механической частей электропривода, исследовать качественные показатели (время переходных процессов, наличие автоколебаний, величину перерегулирования и т.д.), синтезировать структуру корректирующих звеньев при заданных критериях качества.

По результатам исследований на линейной модели привода были разработаны и введены в схему регулирования специальные корректирующие устройства, позволившие устранить эти колебания, что было подтверждено в процессе наладочных испытаний дизель-поезда ДЭЛ-02.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриенко В.Д. Математические модели оптимальных систем управления тяговым асинхронным приводом тепловозов / В.Д. Дмитриенко, А.Ф. Даниленко, Н.И. Заполовский // Электронное моделирование. – 1991. – Т. 13. – №2. – С. 40 – 44.
2. Дмитриенко В.Д. Моделирование и оптимизация систем управления и контроля локомотивов / В.Д. Дмитриенко, Н.И. Заполовский, В.И. Носков, С.Ю. Леонов. – Харьков: ХФИ «Транспорт Украины», 2003. – 248 с.
3. Орловский И.А. Учёт упругих связей и распределённой нагрузки при векторном управлении асинхронным тяговым приводом дизель-поезда / И.А. Орловский, А.Н. Кулешов // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2007. – Вип. 19. – С. 209 – 213.
4. Федяева Г.А. Математическое моделирование электромеханических процессов в асинхронном тяговом приводе тепловоза ТЭМ21 / Г.А. Федяева, В.Н. Федяев // Вестник ВНИИЖТ. – 2005. – №6 – С. 39-45.

5. Глазырин А.С. Математическое моделирование электромеханических систем, аналитические методы: учебное пособие / А.С. Глазырин. – Томск: изд. Томского политехнического университета. – 2009. – 216 с.
6. Яровий Р.О. Моделювання тягового електроприводу маневрового локомотиву з накопичувачем енергії у силовому ланцюгу / Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. – 2015. – №1(218). – С. 284 – 287.
7. Заполовский Н.И. Моделирование тягового электропривода дизель-поезда с учетом сцепления колесных пар с рельсами / Н.И. Заполовский, С.И. Червонный, Р.М. Грыб // Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. – №23. – С.61-66.
8. Носков В.И. Модель электромеханической системы дизель-поезда / В.И. Носков // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2004. – №7(1). – С. 64 – 66.
9. Сандлер А.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями / А.С. Сандлер, Р.С. Сарбатов // – М.: Энергия, 1987. – 328 с.
10. Дмитриенко В.Д. Моделирование и оптимизация процессов управления движением дизель-поездов / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный. – Х.: Изд. центр «НТМТ», 2013. – 248 с.
11. Дмитриенко В.Д. Математическая модель для исследования и оптимизации электропривода дизель-поезда / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный // Электротехнические системы и комплексы. – Магнитогорск: МГТУ, 2014. – №1(22). – С. 35 – 40.
12. Заковоротный А.Ю. Идентификация параметров тягового асинхронного привода дизель-поезда / А.Ю. Заковоротный, Н.В. Мезенцев, Г.В. Гейко // Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2014. – Вып. 35 (1078). – С. 141 – 146.
13. Заковоротный А.Ю. Линейная математическая модель движения дизель-поезда / А.Ю. Заковоротный // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА, 2016. – №1(19Е). – С. 39 – 46.

## MODELING OF RAILWAY CARRIAGE ELECTROMECHANICAL SYSTEM CONSIDERING DISSIPATIVE FORCES

**V.I. Noskov<sup>1</sup>, A.Y. Zakovorotny<sup>2</sup>, N.V. Mezentsev<sup>3</sup>, G.V. Gejko<sup>4</sup>**  
<sup>1, 2, 3, 4</sup> National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute»,  
 Kharkov, Ukraine

**Abstract:** Mathematical model of the electromechanical system of railway carriage with asynchronous electric traction developed. This model takes into account the implementation of the tractive electric motor torque with elastic connections of the mechanical system the interaction of wheel sets and rails. The model allows the design phase to define the boundaries of the drive steady work, to study the quality system of regulation, synthesize structure correcting links with given quality criteria.

**Keywords:** mathematical model, electromechanical system, asynchronous electric traction, elastic connection, wheel set.

### REFERENCES

1. Dmitrienko V.D., Danilenko A.F., Zapolovsky N.I. Mathematical models of optimal control systems traction asynchronous drive locomotives [Matematicheskie modeli optimalnykh sistem upravleniya tyagovym asinhronnym privodom teplovozov], *Elektronnoe modelirovanie [Electronic Modeling]*, 1991, vol. 13, no. 2. pp. 40-44.
2. Dmitrienko V.D., Zapolovsky N.I., Novikov V.I., Leonov S.Y. *Modelirovanie i optimizatsiya sistem upravleniya i kontrolya lokomotivov* [Modelling and optimization of locomotive management and control systems], Kharkov, Transport of Ukraine, 2003, 248 p.
3. Orlovsky I.A., Kuleshov A.N. Accounting elastic connections and a distributed load vector control asynchronous traction drive diesel train [Uchyot uprugih svyazey i raspredelyonnoy nagruzki pri vektornom upravlenii asinhronnym tyagovym privodom dizel-poezda], *Vestnik Dnepropetrovskogo natsionalnogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta imeni akademika V. Lazaryana [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan]*, 2007, vol. 19, pp. 209-213.
4. Fedyaeva G.A., Fedyaev V.N. Mathematical modeling of electromechanical processes in an asynchronous traction drive locomotive TEM21 [Matematicheskoe modelirovanie elektromekhanicheskikh protsessov v asinhronnom tyagovom privode teplovoza TEM21], *Vestnik VNIIZhT [Bulletin VNIIZhT]*, 2005, no. 6, pp. 39-45.
5. Glazyrin A.S. *Matematicheskoe modelirovanie elektromekhanicheskikh sistem, analiticheskie metody: uchebnoe posobie* [Mathematical modeling of electromechanical systems, analytical methods: study guide], Tomsk, Tomsk Polytechnic University, 2009, 216 p.
6. Yaroviyi R.O. Simulation of traction electric shunting locomotives with energy storage in the power circuit [Modelyuvannya tyagovogo elektroprivodu manevrovogo lokomotivu z nakopichuvachem energii u silovomu lantsyugu], *Vestnik Vostochnoukrainskogo natsionalnogo universiteta im. Vladimira Dalia [Journal of East Ukrainian National University named after Vladimir Dahl]*, 2015, no. 1 (218), pp. 284-287.

- 
7. Zapolovsky N.I., Chervonny S.I., Grib R.M. Simulation of traction electric diesel train taking into account coupling wheel sets and rails [Modelirovanie tyagovogo elektroprivoda dizel-poezda s uchetom stsepleniya kole-snyih par s relsami], *Vestnik NTU «HPI». Sbornik nauchnyih trudov. Seriya: Informatika i modelirovanie [Vestnik NTU "KhPI". Collection of scientific papers. Series: Computing and Modeling]*, 2006, no. 23, p. 61-66.
  8. Noskov V.I. Model electromechanical system diesel train [Model elektromekhanicheskoy sistemy dizel-poezda], *Vostochno-evropeyskiy zhurnal peredovyih tehnologiy [Eastern European advanced technology journal]*, 2004, no. 7 (1), pp. 64-66.
  9. Sandler A.S., Sarbatov R.S. *Avtomaticheskoe chastotnoe upravlenie asinhronnyimi dvigatelyami* [Automatic frequency control induction motors], Moscow, Energy, 1987, 328 p.
  10. Dmitrienko V.D., Zakovorotny A.Y. *Modelirovanie i optimizatsiya protsessov upravleniya dvizheniem dizel-poezdov* [Modelling and optimization of management processes of diesel trains], Kharkov, HTMT, 2013, 248 p.
  11. Dmitrienko V.D., Zakovorotny A.Y. Mathematical model for the study and optimization of electric diesel train [Matematicheskaya model dlya issledovaniya i optimizatsii elektroprivoda dizel-poezda], *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы [Electrical systems and complexes]*, 2014, no. 1 (22), pp. 35-40.
  12. Zakovorotny A.Y., Mezentsev N.V., Geiko G.V. Identification of parameters of asynchronous traction drive diesel train [Identifikatsiya parametrov tyagovogo asinhronnogo privoda dizel-poezda], *Vestnik NTU «HPI». Sbornik nauchnyih trudov. Seriya: Informatika i modelirovanie [Vestnik NTU "KhPI". Collection of scientific papers. Series: Computing and Modeling]*, 2014, no. 35 (1078), pp. 141-146.
  13. Zakovorotny A.Y. The linear mathematical model of diesel train movement [Lineynaya matematicheskaya model dvizheniya dizel-poezda], *Vestnik Donbasskoy gosudarstvennoy mashinostroitelnoy akademii: sbornik nauchnyih trudov [Bulletin of Donbass State Engineering Academy: scientific research journal]*, 2016, no. 1(19E). pp. 39-46.

## СЛУЧАЙНАЯ СТРАТЕГИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СИНТЕЗА ТОПОЛОГИИ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Е.Л. Миркин<sup>1</sup>, С.С. Нежинских<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>УНПК «Международный Университет Кыргызстана», г. Бишкек, Киргизия

<sup>1</sup>eugene\_mirkin@mail.ru, <sup>2</sup>nezhinskikh.sergei@gmail.com

**Аннотация.** На базе предложенного в [1] метода самоорганизации нейронной сети предлагается случайная стратегия формирования её топологии. Модификация метода основана на случайном выборе места добавления в исходную структуру нейронной сети нового нейрона, не ухудшающего суммарный показатель качества работы сети в процессе эволюции её топологии. Приведены результаты компьютерного моделирования, подтверждающие эффективность предложенной схемы.

**Ключевые слова:** нейронные сети; метод самоорганизации; случайная стратегия.

Искусственные нейронные сети являются эффективным средством решения сложных плохо формализуемых задач [2]. Использование нейросетевого подхода не требует формального математического описания причинно-следственных связей сложно формализованных систем [3]. Повышение производительности вычислительных систем, стимулировало в последнее время повышенный интерес исследователей к теории и практике использования искусственных нейронных сетей в различных сферах человеческой деятельности.

Использование нейронных сетей в качестве моделей сложных причинно-следственных систем сопровождается рядом проблем, которые должен решать исследователь. Одни из основных проблем это:

- проблема выбора топологии нейронной сети;
- проблема выбора начальных коэффициентов настройки сети.

Выбор топологии нейронной сети является неформализованной проблемой и зависит от сложности решаемой задачи и интуиции исследователя [4]. При этом выбор сложной топологии сети с избыточным количеством нейронов ведёт к усложнению процесса обучения сети и увеличению количества настраиваемых коэффициентов. В тоже время, выбор достаточно простой топологии не гарантирует решение сложной задачи. Поэтому процесс выбора топологии сети зависит от исследователя.

В то же время, мультимодальность целевой функции процесса обучения сети обуславливает проблему выбора начальных коэффициентов настройки сети, которые не всегда гарантируют попадание в локальный минимум, позволяющий решить задачу. В этом случае приходится выполнять периодическую рандомизацию весовых коэффициентов и повторять процесс обучения сети в надежде переместиться в более выгодный локальный минимум, решающий задачу [5, 6]. Попытку решения этой проблемы осуществляют различными методами, например, методом имитации отжига, методом встряхивания, методом виртуальных частиц [7]. Все эти методы требуют ручного вмешательства исследования, на различных этапах решения задачи [6, 8, 9].

В [1] предложен метод синтеза топологии нейронной сети, который позволяет автоматизировать процесс создания топологии нейронной сети в процессе решения задачи.

Метод основан на добавлении в существую-

щую структуру нейронной сети типового фрагмента, не ухудшающего суммарный показатель качества работы сети в процессе её настройки. Тем самым, этап выполняемый, обычно, исследователем, заменяется автоматизированным выбором усложнённой топологии, а коэффициенты нейронной сети, полученные в результате её обучения на предыдущем этапе, сохраняются и переходят в следующий этап оптимизации. Таким образом, метод гарантирует не ухудшение суммарного показателя качества настройки сети в процессе её эволюции. При этом «накопленный опыт» уменьшения суммарного показателя качества настройки сети используется системой на следующих этапах эволюции сети.

В работах [10, 11, 12] этот метод был использован для создания компьютерных интеллектуальных систем в медицине.

В данной работе предлагается формировать топологию сети в точках эволюции с помощью случайной стратегии.

### Постановка задачи

В классе задач обучения нейронных сетей с учителем, требуется разработать метод случайной самоорганизации топологии нейронной сети в процессе её настройки, позволяющий автоматизировать процесс решения конкретной задачи. При этом необходимо учитывать накопленный опыт обучения сети в дискретные моменты времени её эволюции, не увеличивая интегрированную ошибку обучения.

### *Метод случайной самоорганизации топологии нейронной сети*

Процесс самоорганизации топологии нейронной сети будем увязывать с главным показателем настройки сети – *интегрированной ошибкой* её обучения. Потребуем, чтобы в процессе самоорганизации топологии нейронной сети интегрированная ошибка обучения в процессе решения конкретной задачи не увеличивалась в дискретные моменты времени, когда принимается решение усложнить

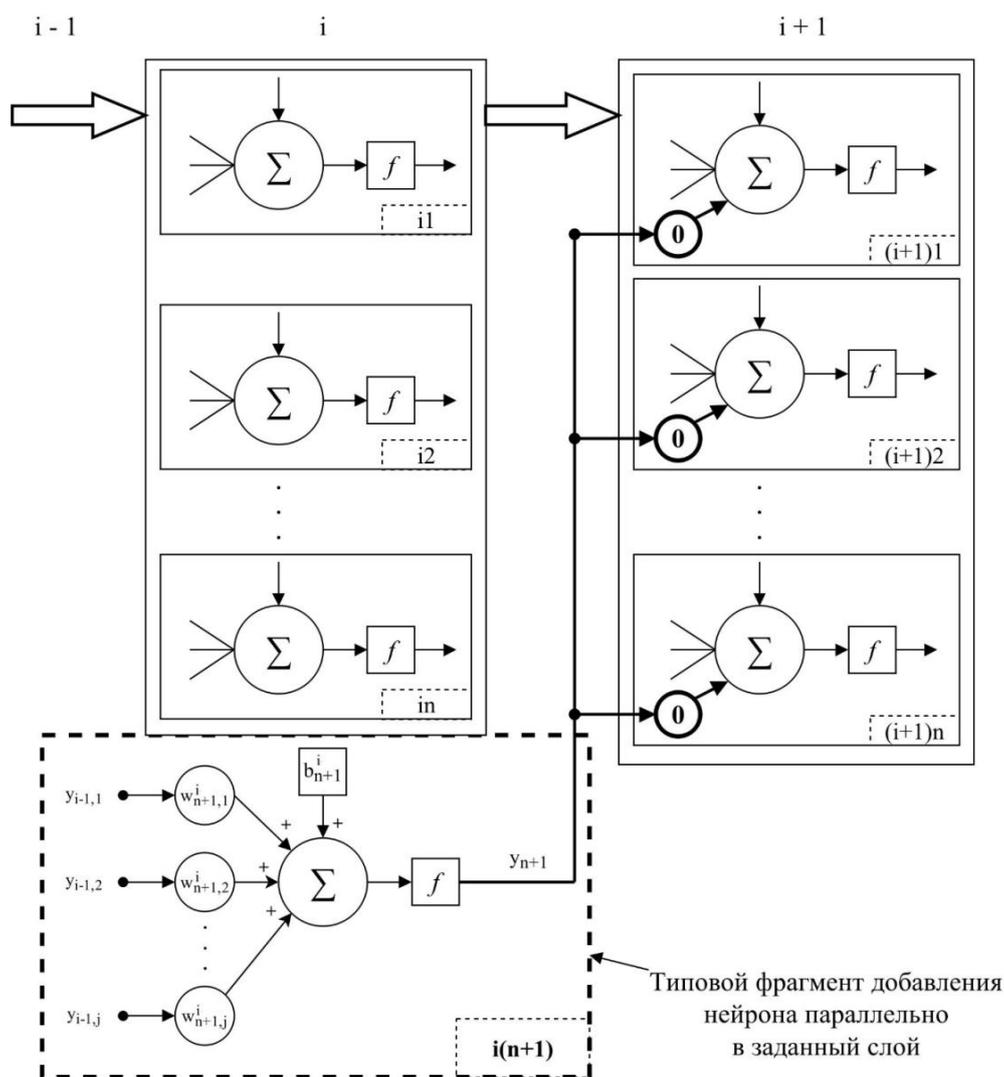


Рис. 1. Схема добавления нового нейрона параллельно в слой:

$i$  – номер слоя, в который добавляют нейрон;  $n$  – количество нейронов в слое;  $f$  – заданная функция активации нейрона;  $w$  – настраиваемый коэффициент;  $y$  – выход нейрона;  $j$  – количество нейронов в слое  $i - 1$

топологию. Это позволит, учитывая предыдущий опыт настройки нейронной сети, сохраняя её предыдущую структуру и настроенные коэффициенты в ней, для будущего этапа настройки с измененной структурой.

Таким образом, для организации процесса эволюции топологии нейронной сети необходимо решить следующие задачи:

1. Создать типовой фрагмент нейронной сети, не увеличивающий интегрированную ошибку её обучения при соединении его с первоначальной структурой. В соответствии с [1, 10] типовой фрагмент добавления нового нейрона в  $i$ -й слой приведен на рис. 1. Из рис. 1 видно, что новый нейрон добавляется в текущий слой с нулевыми коэффициентами, соединяющими его со следующим слоем. Такая схема подключения позволяет сохранить ошибку обучения на том же уровне в момент эволюции сети.
2. Определить дискретные моменты времени, когда необходимо усложнять топологию сети.
3. Определить правила самоорганизации нейронной сети (т.е. точки подключения типовых фрагментов к исходной структуре сети) в процессе решения конкретной задачи.

Рассмотрим подробнее решение второго и третьего этапа синтеза нейронной сети:

Определение дискретных моментов времени эволюции сети. Задача определения дискретных моментов времени, когда необходимо усложнять топологию сети может быть решена, например, путём контроля порога интегрированной ошибки обучения нейронной и одновременного контроля порога градиента ошибки обучения сети. Если эти показатели не изменяются в течение нескольких эпох обучения, а система при этом считается необученной, то процесс обучения следует прервать и усложнить топологию. Как правило, проверка этих же условий и останавливает процесс обучения нейронной сети в большинстве типовых случаях, если достигнуты пороги обучения [13, 14].

Этап *определения правил самоорганизации нейронной сети* является наиболее неформальным и может быть выполнен различными способами. В данной статье рассмотрим способ формирования топологии нейронной сети с помощью случайной стратегии, заключающейся в следующем.

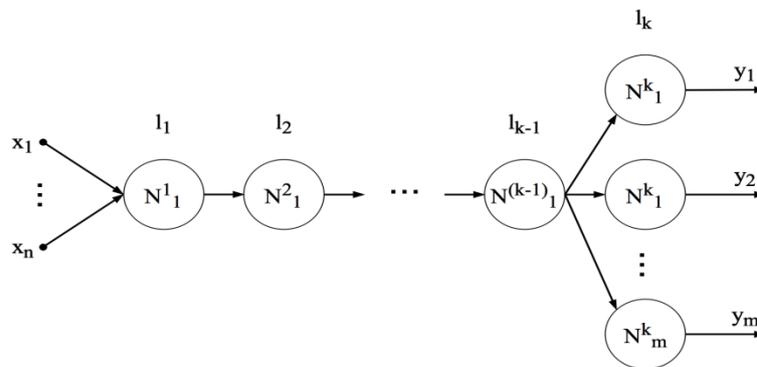


Рис. 2. Начальная топология сети

Таблица 1

Таблица истинности функции XOR

№ записи	Входной сигнал							Эталонный сигнал
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$y$
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0	0	1
3	0	1	0	0	0	0	0	1
4	1	1	0	0	0	0	0	0
253	0	0	1	1	1	1	1	1
254	1	0	1	1	1	1	1	0
255	0	1	1	1	1	1	1	0
256	1	1	1	1	1	1	1	1

**Предлагаемый алгоритм случайной стратегии самоорганизации нейронной сети:**

*Первый шаг.* Формируем максимальное количество слоёв в сети (в каждом слое один нейрон, с логистической функцией активации) (рис. 2).

*Второй шаг.* Если интегрированная ошибка  $E_n$  после  $n$  эпох обучения превышает пороговое значение, то добавляется один нейрон специального вида (рис. 1) параллельно в случайно выбранный слой [10]. Количество нейронов в слое может быть заранее ограничено.

*Третий шаг.* Вбрасывание нового нейрона в существующую сеть повторяется до тех пор, пока не будет достигнуто решение задачи или превышено ограничение на максимально возможную конфигурацию сети.

Нужно отметить, что в моменты эволюции сети суммарная ошибка обучения сети  $E_n$  не возрастает, а все «обученные» коэффициенты предыдущего этапа переходят в следующий этап обучения в качестве начальных параметров настройки нейронной сети.

На рис. 2 изображена начальная топология сети, где:  $x$  – сигнал входа,  $n$  – количество входов;  $l$  – слой нейронной сети,  $k$  – количество слоёв;  $N$  – нейрон, верхний индекс – номер слоя, нижний индекс – номер нейрона в слое;  $y$  – выходной сигнал,  $m$  – количество выходов.

**Пример моделирования**

Для демонстрации эффективности предложенного метода случайной самоорганизации нейронной сети, рассмотрим задачу обучения сети для функции XOR (логического исключаящего «ИЛИ») семь входов – один выход. Вход – выходные множества сигналов функции XOR приведены в табл. 1.

Были использованы три попытки формирования нейросетевой модели XOR с помощью предложенной случайной стратегии. Для моделирования была использована однонаправленная сеть, обучаемая с применением алгоритма обратного распространения. В качестве функций активации выбрана сигмоидная функция в виде гиперболического тангенса. В качестве обучающей функции использован метод Левенберга-Маркара (Levenberg-Marquardt) [15, 16, 17].

Данный пример иллюстрирует эволюцию изменения топологии сети в каждом из трёх случаев до момента решения задачи.

**Случайная стратегия №1**

Начальная конфигурация нейронной сети, в соответствии с предложенным алгоритмом, состоит из трёх слоёв, каждый из которых состоит из одного нейрона (рис. 3) с функцией активации  $f$  – гиперболический тангенс. Начальные значения настраиваемых параметров для нейронов данной топологии были заданы в виде:  $b^1 = [0.2]$ ,  $w^1 = [-1.6, -1.8, 3.3, 0.9, 0.1, 1.9, -3.1]$ ,  $b^2 = [-2.8]$ ,  $w^2 = [5.6]$ ,  $b^3 = [-2.8]$ ,  $w^3 = [5.7]$ . По условию задачи выход нейронной сети  $y$  имеет один сигнал. Сеть будет считаться обученной при достижении значения интегрированной ошибки сети следующего порога  $\bar{E} = 0.005$ . При этом, точка эволюции сети будет определяться завершением максимального количества эпох обучения равного

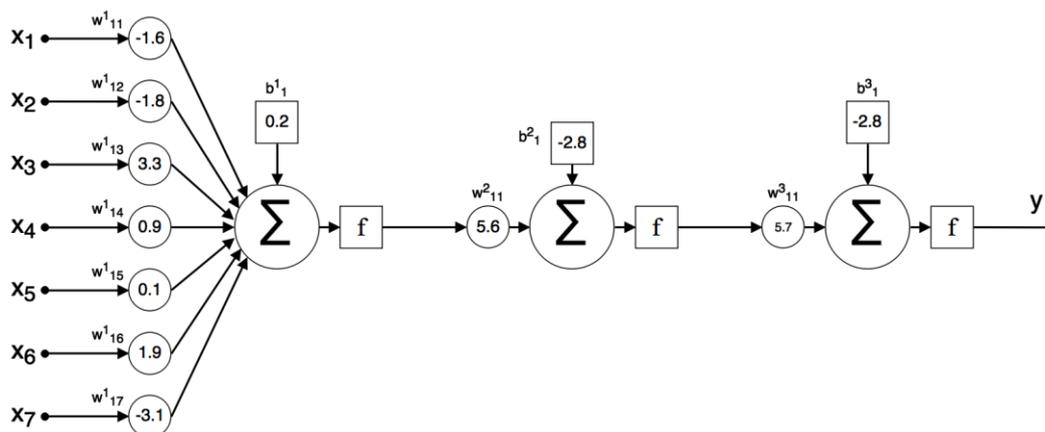


Рис. 3. Конфигурация начального этапа эволюции сети

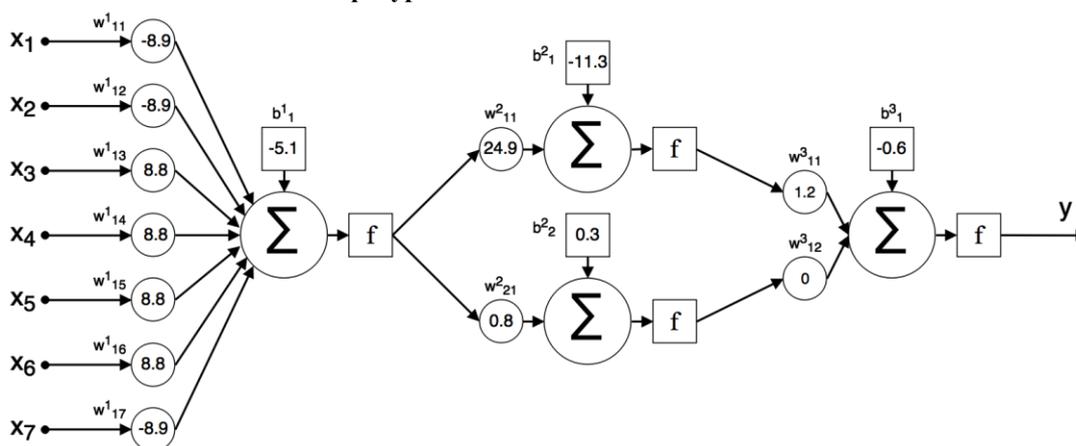


Рис. 4. Конфигурация второго этапа эволюции сети

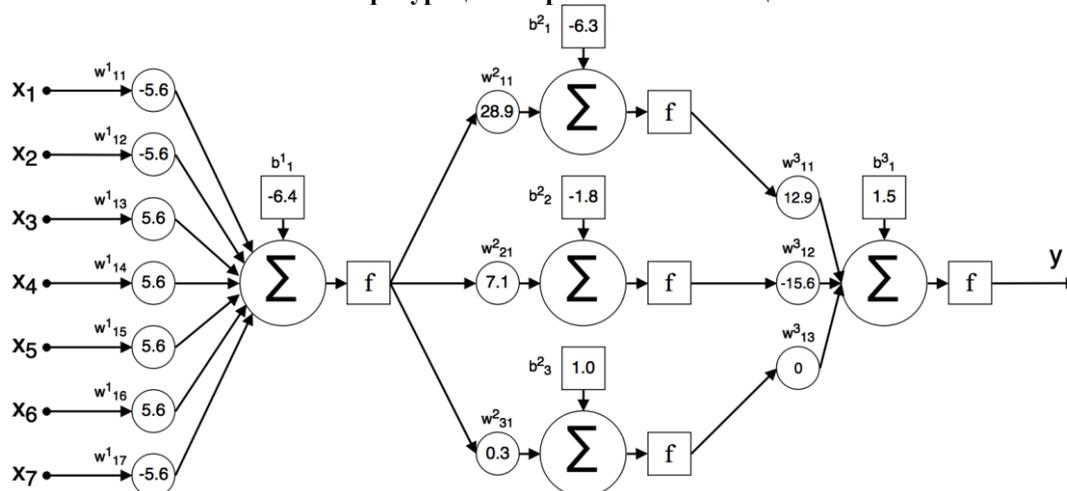


Рис. 5. Конфигурация третьего этапа эволюции сети

250, либо достижением градиента обучения сети меньше порога установленного в значение 0.0002.

Первый этап обучения сети был прерван на 182-ой эпохе, когда градиент достиг заданного порогового значения. Сеть считалась не обученной, так как значение интегрированной ошибки сети  $E$  уменьшилось с величины  $E_0 = 0.38$  до величины  $E_{182} = 0.23$ , не достигнув заданного порога  $\bar{E}$ .

В соответствии с предлагаемой процедурой, на втором этапе в сеть случайным образом был добавлен нейрон во второй слой сети (рис. 4).

Второй этап обучения сети был завершён на 250-ой эпохе, достигнув порогового значения. Значение интегрированной ошибки сети уменьшилось с величины  $E_{182} = 0.23$  до

величины  $E_{432} = 0.15$ , что является выше порогового уровня  $\bar{E}$ .

На следующем этапе нейрон был добавлен во второй слой (рис. 5).

Обучение сети на третьем этапе было остановлено по достижению 250-ой эпохи. Интегрированная ошибка сети имела значение  $E_{682} = 0.04$ , что не удовлетворяет заданному условию.

На четвёртом этапе добавление нейрона произошло в первом слое (рис. 6). На рис. 6:  $x$  – входные сигналы;  $y$  – выход нейронной сети;  $N$  – нейрон, верхний индекс – номер слоя, нижний индекс – номер нейрона в данном слое.

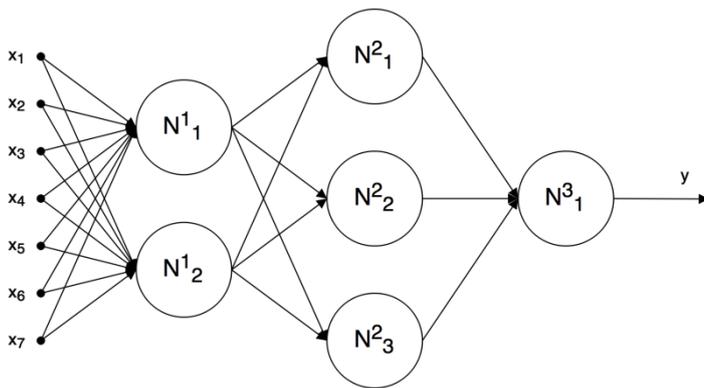


Рис. 6. Топология четвертого этапа эволюции сети

Однако, по завершению 250 эпох, интегрированная ошибка сети имела неудовлетворяющее требованиям значение  $E_{932} = 0.013$ .

На следующем, пятом, этапе обучения сети нейрон был добавлен в первый слой (рис. 7).

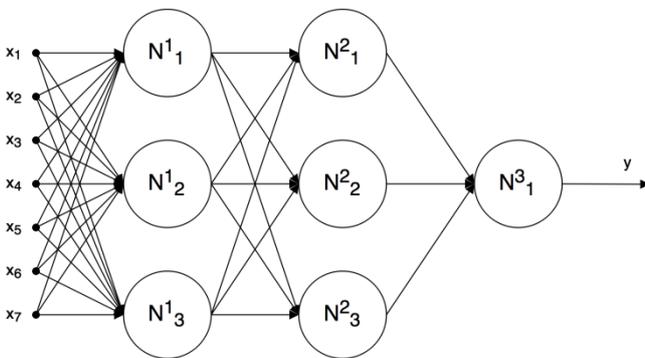


Рис. 7. Топология пятого этапа эволюции сети

Пятый этап обучения сети состоял из шести эпох, а интегрированная ошибка обучения сети достигла заданного порогового значения и составила  $E_{938} = 0.004$ .

На рис. 8 приведена кривая изменения интегрированной ошибки обучения сети в процессе её эволюции.

На рис. 9 представлены кривые настройки некоторых коэффициентов сети в процессе эволюции, где:  $b_1^1$  – смещение первого нейрона (нижний индекс) первого слоя (верхний индекс), начальное значение равно 0.2;  $w_{13}^1$  – вес третьего входа (нижний индекс, вторая цифра) первого нейрона (нижний индекс, первая цифра) в первом слое, начальное значение 3.3;  $b_2^2$  – смещение второго нейрона во втором слое, данный нейрон был добавлен на втором этапе эволюции сети, начальное значение 0.28.

В табл. 2 показана матрица добавления нейронов сети в различные этапы ее эволюции. Курсивом выделено количество нейронов, добавляемых в каждый слой на каждом этапе.

Таблица 2

Матрица добавления нейронов сети

Этапы эволюции сети	Слой 1	Слой 2	Слой 3
1	1	1	1
2	0	1	0
3	0	1	0
4	1	0	0
5	1	0	0

Таким образом, приведённый пример моделирования настройки сети демонстрирует все заявленные выше качества предлагаемого метода:

- самоорганизация системы до состояния решения задачи (рис. 7, 8);
- уменьшение интегрированной ошибки обучения сети в процессе её эволюции (рис. 8);
- использование «накопленного» опыта предыдущего этапа обучения для следующего этапа (рис. 8, 9).

Рассмотрим альтернативные стратегии случайного добавления нейронов с заданной начальной точки, которые приводили к решению задачи с другими моментами эволюции сети.

### Случайные стратегии №2 и №3

Матрицы случайного добавления нейронов для стратегий №2 и №3, приведены в табл. 3, 4 соответственно. Как видно из табл. 3, для решения поставленной задачи стратегией №2 потребовалось семь этапов. Стратегия №3 достигла заданного порога интегрированной ошибки сети на шестом этапе эволюции сети.

Таблица 3

Матрица добавления нейронов (моделирование №2)

Этапы эволюции сети	Слой 1	Слой 2	Слой 3
1	1	1	1
2	1	0	0
3	0	1	0
4	0	1	0
5	1	0	0
6	0	1	0
7	1	0	0

Таблица 4

Матрица добавления нейронов (моделирование №3)

Этапы эволюции сети	Слой 1	Слой 2	Слой 3
1	1	1	1
2	0	1	0
3	0	1	0
4	1	0	0
5	0	1	0
6	1	0	0

Иллюстрация процесса решения задачи альтернативными случайными стратегиями №2 и №3 (табл. 3, 4) приведена на рис. 10.

Как видно из рис. 10, решение поставленной задачи достигается различными конфигурациями топологий сети, сформированными случайным образом. При этом количество этапов эволюции и количество эпох обучения нейронной сети до достижения цели могут быть различными.

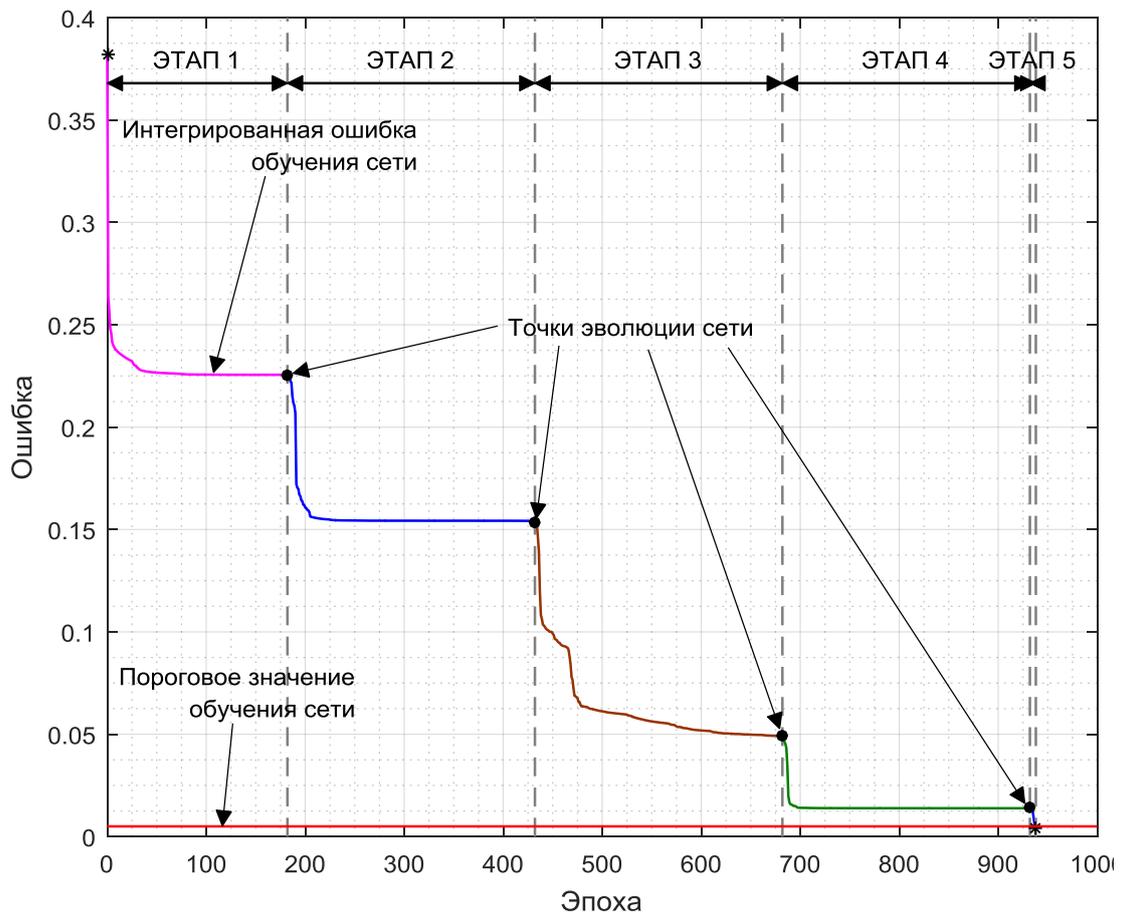


Рис 8. Динамика изменения интегрированной ошибки обучения сети

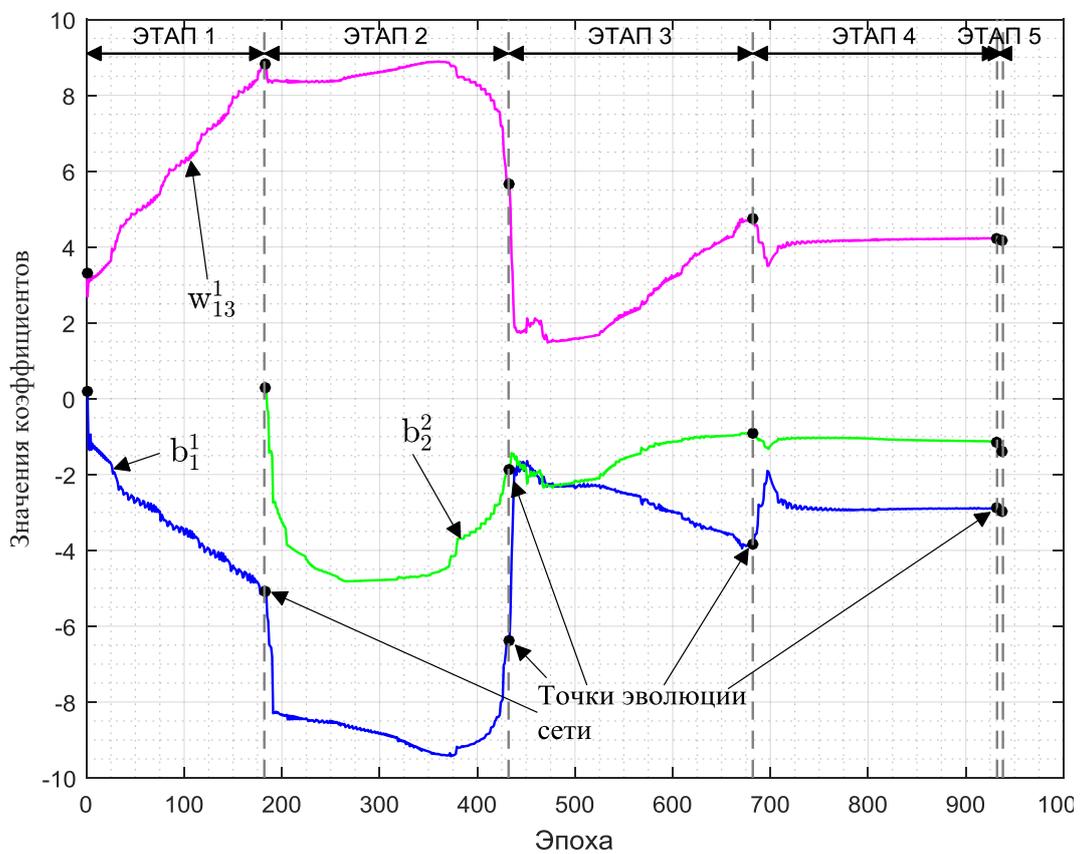


Рис 9. Коэффициенты сети в процессе эволюции

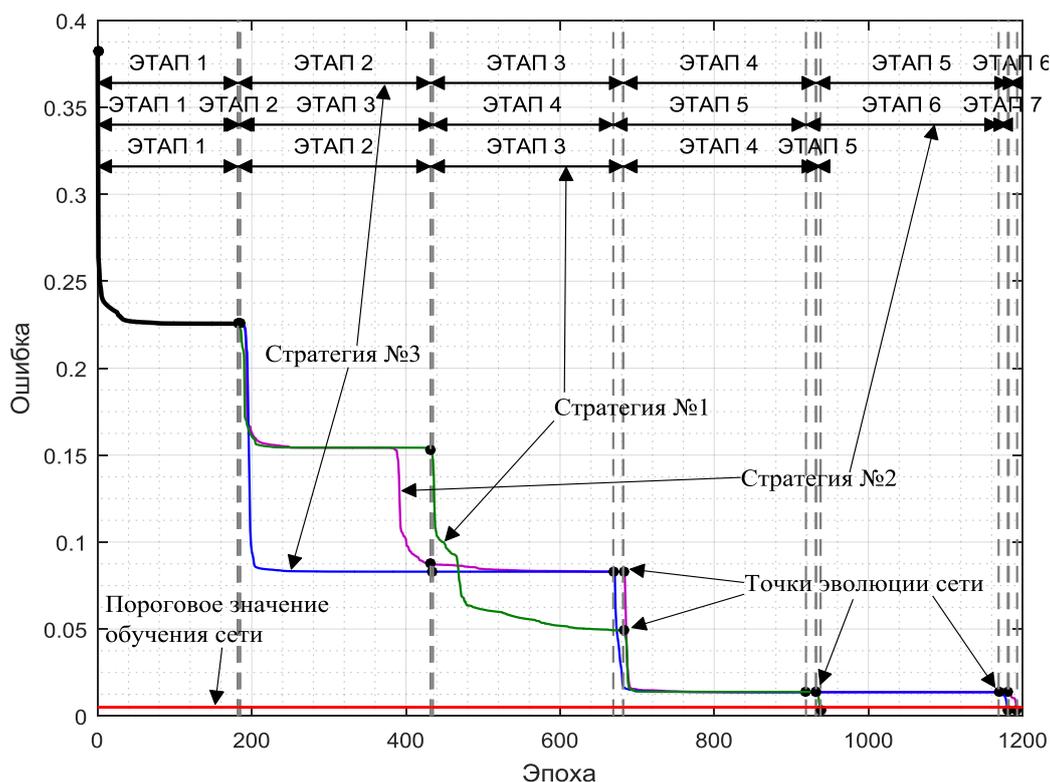


Рис. 10. Процесс решения задачи различными случайными стратегиями

### Заключение

В работе предложен новый метод автоматизированного формирования топологии нейронной сети с помощью случайной стратегии. Метод основан на добавлении в существующую структуру сети типового фрагмента, не ухудшающего суммарный показатель качества её работы. Тем самым, этап подбора более сложной топологии, выполняемый, обычно, исследователем - заменяется автоматизированным выбором. При этом коэффициенты нейронной сети, полученные в результате её обучения на предыдущем этапе эволюции, сохраняются и переходят в следующий этап. С усложнением топологии, суммарный показатель качества настройки сети постоянно уменьшается, а «накопленный опыт» обучения сети на предыдущих этапах, передаётся на следующий этап.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Миркин, Е.Л. Метод формирования топологии самоорганизующейся нейронной сети в процессе её обучения [Текст] / Е.Л. Миркин, С.С. Нежинских // Проблемы автоматизации и управления №2. – Бишкек, 2014. – С. 28 – 36.
2. Hagan, Martin T. Neural Network Design (2nd Edition) [Текст] / Martin T. Hagan, Howard B. Demuth, Mark Hudson Beale, Orlando De Jesus. – 2-ое изд. – 2014. – 1012 с.
3. Raf, Lionel Neural Networks in Chemical Reaction Dynamics [Текст] // Lionel Raf, Ranga Komanduri, Martin Hagan, Satish Bukkaratnam. – 1-е изд. – 2012. – 285 с.
4. Haykin, Simon S. Neural Networks and Learning Machines / Simon S. Haykin // Prentice Hall, 2009. – 906 с.
5. Montavon, Grégoire Neural Networks: Tricks of the Trade / Grégoire Montavon, Geneviève Orr, Klaus-Robert Müller // Springer, 2012. – 769 с.

6. Wang, Jun Advances in Neural Networks / Jun Wang // ISSN 2006: Pt. III: Third International. – Springer Science & Business Media, 2006. – 1402 с.
7. Каллан, Роберт. Основные концепции нейронных сетей / Роберт Каллан. – Москва, Вильямс, 2003. – 288 с.
8. Wang, Zhanshan Qualitative Analysis and Control of Complex Neural Networks with Delays / Zhanshan Wang, Zhenwei Liu, Chengde Zheng // Springer, 2015. – 388 с.
9. Du, Ke-Lin Neural Networks and Statistical Learning / Ke-Lin Du, M. N. S. Swamy // Springer Science & Business Media, 2013. – 824 с.
10. Нежинских, С.С. Использование метода самоорганизации нейронной сети в задаче медицинской диагностики трудности процесса интубации [Текст] / С.С. Нежинских, О.В. Волкович, Е.Л. Миркин, А.Н. Маматов // Материалы II международной конференции "Проблемы управления и информационных технологий". – Бишкек, 2015. – С. 108 – 117.
11. Нежинских, С.С. Применение технологии самоорганизующихся нейронных сетей в задаче медицинской диагностики [Текст] / С.С. Нежинских // Автоматизированные технологии и производства №1(11). – Магнитогорск, 2016. – С. 56 – 62.
12. Акрамов, Э.Х. Разработка компьютерной системы диагностики показателя операции по поводу синдрома кишечной непроходимости [Текст] / Э.Х. Акрамов, Е.Л. Миркин, О.В. Волкович, С.С. Нежинских, А.Т. Салиев // Проблемы автоматизации и управления №2. – Бишкек, 2015. – С. 56 – 63.

- 
13. Хайкин, Саймон. Нейронные сети. Полный курс. [Текст] / Саймон Хайкин. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2006. – 1104 с.
14. Аксенов, С.В. Организация и использование нейронных сетей (методы и технологии) [Текст] / С.В. Аксенов, В.Б. Новосельцев. – Томск: НТЛ, 2006. – 128 с.
15. Барский, А.Б. Логические нейронные сети [Текст] / А.Б. Барский // Финансы и статистика. – Москва, 2004. – 176 с.
16. Annema, Jouke Feed-Forward Neural Networks: Vector Decomposition Analysis, Modelling and Analog Implementation / Jouke Annema // Springer Science & Business Media, 2012. – 238 с.
17. Rojas, Raul Neural Networks: A Systematic Introduction / Raul Rojas // Springer Science & Business Media, 2013. – 502 с.
- 

## RANDOM STRATEGY OF FORMING A SELF-ORGANIZING NEURAL NETWORK TOPOLOGY

E.L. Mirkin<sup>1</sup>, S.S. Nezhinskikh<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>International University of Kyrgyzstan, Bishkek, Kyrgyzstan

**Abstract.** Based on the proposed in [1] a method of self-organizing neural network is proposed random strategy of developing its topology. Modification based on a random selection of adding space to the original structure of the neural network of the new neuron does not degrade the overall index of network quality in the evolution of its topology. The results of computer simulations, confirming the effectiveness of the proposed scheme.

**Keywords:** neural networks; self-organization method; random strategy.

### REFERENCES

1. Mirkin E.L., Nezhinskikh S.S. Method of forming a self-organized topology of neural network in the process of learning [Metod formirovaniya topologii samoorganizuyushchey-sya neyronnoy seti v protsesse ee obucheniya], [*Problemy avtomatiki i upravleniya*], Bishkek, 2014, no. 2, pp. 28-36.
2. Hagan, Martin T. Neural Network Design (2<sup>nd</sup> Edition) [Text] / Martin T. Hagan, Howard B. Demuth, Mark Hudson Beale, Orlando De Jesus. – 2<sup>nd</sup> edition. – 2014. – 1012 p.
3. Raf, Lionel Neural Networks in Chemical Reaction Dynamics [Text] // Lionel Raf, Ranga Komanduri, Martin Hagan, Satish Bukkatnam. – 2012. – 285 p.
4. Haykin, Simon S. Neural Networks and Learning Machines / Simon S. Haykin // Prentice Hall, 2009. – 906 p.
5. Montavon, Grégoire Neural Networks: Tricks of the Trade / Grégoire Montavon, Geneviève Orr, Klaus-Robert Müller // Springer, 2012. – 769 p.
6. Wang, Jun Advances in Neural Networks / Jun Wang // ISSN 2006: Pt. III: Third International. – Springer Science & Business Media, 2006. – 1402 p.
7. Callan R. Osnovnye kontseptsii neyronnykh setey [The Essence of Neural Networks], Moscow, Williams, 2003, 288 p.
8. Wang, Zhanshan Qualitative Analysis and Control of Complex Neural Networks with Delays / Zhanshan Wang, Zhenwei Liu, Chengde Zheng // Springer, 2015. – 388 p.
9. Du, Ke-Lin Neural Networks and Statistical Learning / Ke-Lin Du, M. N. S. Swamy // Springer Science & Business Media, 2013. – 824 p.
10. Nezhinskikh S.S., Volkovich O.V., Mirkin E.L., Mamatov A.N. Use of self-organizing neural network in the problem of medical diagnostic difficulties of intubation [Ispol'zovanie metoda samoorganizatsii neyronnoy seti v zadache meditsinskoy diagnostiki trudnosti protsesssa intubatsii], *Materialy II mezhdunarodnoy konferentsii "Problemy upravleniya i informatsionnykh tekhnologiy"*, Bishkek, 2015, pp. 108 – 117.
11. Nezhinskikh S.S. Application of the technology of self-organizing neural networks in the problem of medical diagnosis [Primenenie tekhnologii samoorganizuyushchikhsya neyronnykh setey v zadache meditsinskoy diagnostiki], *Automation of technologies and production [Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva]*, no. 11(1), 2016, pp. 56-62.
12. Akramov E.Kh., Mirkin E.L., Volkovich O.V., Nezhinskikh S.S., Saliev A.T. Development of computer diagnostic systems indications for surgery for intestinal obstruction syndrome [Razrabotka komp'yuternoy sistemy diagnostiki pokazaniya operatsii po povodu sindroma kishechnoy neprokhodimosti], [*Problemy avtomatiki i upravleniya*], Bishkek, 2014, no. 2, pp. 56 – 63.
13. Haykin S. Neyronnye seti. Polnyy kurs. [Neural Networks - A Comprehensive Foundation], Moscow, Williams, 2006, 1104 p.
14. Aksenov S.V., Novosel'tsev V.B. Organizatsiya i ispol'zovanie neyronnykh setey (metody i tekhnologii), Tomsk, NTL, 2006, 128 p.
15. Barskiy A.B. Logicheskie neyronnye seti [Logic Neural Networks, Moscow, Finansy i statistika, 2004, 176 p.
16. Annema, Jouke Feed-Forward Neural Networks: Vector Decomposition Analysis, Modelling and Analog Implementation / Jouke Annema // Springer Science & Business Media, 2012. – 238 p.
17. Rojas, Raul Neural Networks: A Systematic Introduction / Raul Rojas // Springer Science & Business Media, 2013. – 502 p.

УДК 669.1:622

## ОБНАРУЖЕНИЕ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ МЕТОДОМ ВЫЧИТАНИЯ ФОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СМЕСИ ГАУССОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ

А.Н. Заливин<sup>1</sup>, Н.С. Балабанова<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет»,  
г. Белгород, Россия

<sup>2</sup>balabanovan7@gmail.com

**Аннотация.** Задача обнаружения движущихся объектов была поставлена достаточно давно, хотя вследствие своей специфики, она пока не имеет конкретного решения, так как условия обнаружения бывают различны. В данной статье рассматривается обнаружение движущихся объектов (машины, люди) методом вычитания фона с использованием смеси Гауссовых распределений. Исследуется работа метода в различных условиях: наличие падающего снега, который в данном случае считается шумом, а также в условиях ограниченной освещенности.

**Ключевые слова:** обнаружение движущихся объектов; смесь Гауссовых распределений; вычитание фона.

### Актуальность

Обнаружение движущихся объектов на видеоизображениях привлекло большой интерес в области компьютерного зрения. Обнаружение объектов является важным шагом в системах видеонаблюдения, системах навигации и при распознавании объектов. В настоящее время системы видеонаблюдения используются в банках, музеях, на дорогах, в системах военной, общественной безопасности и т.д. Кроме обычных функций: вывода видеоизображения на монитор и записи на какой-либо носитель, системы наблюдения дополняются модулями интеллектуального обнаружения движения и сопровождения цели [1]. Одним из подходов является применение метода вычитания фона с использованием смеси Гауссовых распределений, как одного из эффективных среди методов данной группы. В связи с чем, актуальным представляется исследование метода вычитания фона, основанного на смеси Гауссовых распределений.

### Метод вычитания фона с использованием смеси Гауссовых распределений (Gaussian Mixture Model - GMM)

Данный метод основан на адаптивном статистическом моделировании интенсивностей пикселей. Смесь из нескольких гауссиан (где  $K$  обычно выбирается в диапазоне от 3 до 5) используется для построения модели заднего фона и детектирования движущихся объектов [2].

При построении фона по данному методу считается, что для любого пикселя  $(x_0, y_0)$  изображения  $I_k$  известна история изменения его интенсивности/цвета на всех предыдущих кадрах:

$$\{X_1, X_2, \dots, X_k\} = \{I_j(x_0, y_0), j = \overline{1, k}\}.$$

Тогда вероятность наблюдения значения  $X_k$ , представляется смесью Гауссовых распределений [3]:

$$P(X_k) = \sum_{j=1}^s \omega_j^k N(X_k | \mu_j^k, \Sigma_j^k), \quad (1)$$

где  $\omega_j^k$  – вес  $j$ -ого распределения Гаусса для кадра с номером  $k$ ,  $\mu_j^k$  – математическое ожидание,  $\Sigma_j^k$  – среднеквадратичное отклонение,  $N(X_k | \mu_j^k, \Sigma_j^k)$  – функция плотности нормального распределения, которая выражается следующей формулой:

$$N(X_k | \mu_j^k, \Sigma_j^k) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{D}{2}} |\Sigma_j^k|^{\frac{1}{2}}} e^{-\frac{1}{2}(X_k - \mu_j^k)^T (\Sigma_j^k)^{-1} (X_k - \mu_j^k)} \quad (2)$$

Предполагается, что составляющие цвета являются независимыми и имеют одинаковую среднеквадратичную погрешность. Исходя из этого матрицу ковариации можно записать, как

$$\Sigma_j^k = (\sigma_j^k)^2 E, \quad (3)$$

где  $E$  – единичная матрица.

Исходя из данного утверждения, можно уменьшить вычислительную трудоемкость метода за счет отсутствия необходимости вычислять матрицу, обратную

к матрице ковариации  $\Sigma_j^k$ . Таким образом, задано распределение наблюдаемых значений цвета для каждого пикселя. Новое значение цвета можно представить как одну из основных компонент полученной смеси Гауссовых распределений [4]. Также оно может использоваться для обновления параметров модели. Построенные распределения сортируются в порядке уменьшения величины:

$$r_j^k = \frac{\omega_j^k}{\sigma_j^k}. \quad (4)$$

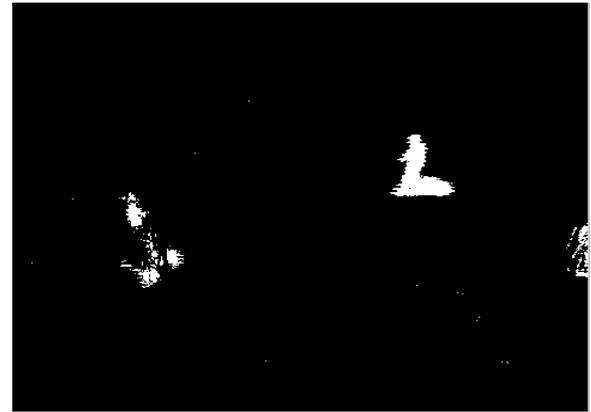


Рис.1. Исходный кадр видео (а) и бинарное изображение (маска) (б)

При данной сортировке пиксель фона отвечает распределению с большим весом и малой дисперсией.

Первые  $B^k$  распределений можно отнести к цвету фоновых пикселей, когда

$$B^k = \arg \min_b \left\{ \sum_{j=1}^b \omega_j^k > T \right\}, \quad (5)$$

где  $T$  – пороговое значение, параметр модели.

При появлении следующего кадра  $I_{k+1}$  для каждого пикселя изображения выполняется тест, с помощью которого, при использовании расстояния Махаланобиса, определяется, какому распределению соответствует полученное значение.

$$\sqrt{(X_{k+1} - \mu_j^k)^T (\Sigma_j^k)^{-1} (X_{k+1} - \mu_j^k)} < 2.5\sigma_j^k \quad (6)$$

Тогда возможны две ситуации [5]:

1. Если нашлось соответствующее распределение Гаусса, то в зависимости от того, определяет ли оно распределение фоновых пикселей (входит в группу из  $B^k$  распределений) или нет, текущий пиксель определяется как фоновый или как принадлежащий объекту.
2. В случае, если ни одно распределение не соответствует распределению Гаусса, удовлетворяющего условию (6), то считается, что пиксель принадлежит объекту.

По данному правилу формируется двумерная маска.

Перед тем, как приступить к работе над следующим кадром, необходимо обновить параметры распределений: математическое ожидание  $\mu_j^k$  и среднеквадратичное отклонение  $\sigma_j^k$ . Обновление выполняется в зависимости от результата нахождения соответствующего распределения для цвета текущего пикселя следующим образом [6]:

1. Соответствие обнаружено. В таком случае весовые коэффициенты, составляющие смесь Гауссовых распределений, которым соответствует  $X_{k+1}$ , и параметры распределений пересчитываются по следующим формулам:

$$\omega_j^{k+1} = (1 - \alpha)\omega_j^k + \alpha, \quad (7)$$

$$\mu_j^{k+1} = (1 - \rho)\mu_j^k + \rho X_{k+1}, \quad (8)$$

$$(\sigma_j^{k+1})^2 = (1 - \rho)(\sigma_j^k)^2 + \rho(X_{k+1} - \mu_j^{k+1})(X_{k+1} - \mu_j^{k+1})^T, \quad (9)$$

где  $\alpha$  – заданная константа,  $\rho = \alpha N(X_{k+1} | \mu_j^k, \Sigma_j^k)$ .

В случае, если для всех распределений  $X_{k+1}$  не соответствует, параметры не изменяются, однако пересчитываются коэффициенты  $\omega_j^{k+1}$  по следующей формуле:

$$\omega_j^{k+1} = (1 - \alpha)\omega_j^k. \quad (10)$$

2. Соответствие не обнаружено. Тогда последнее (в смысле введенного отношения порядка) распределение Гаусса замещается распределением с новыми параметрами. Математическое ожидание уравнивается текущему значению цвета пикселя:

$$\mu_s^{k+1} = X_{k+1}. \quad (11)$$

Дисперсия  $(\sigma_s^{k+1})^2$  выбирается максимально возможной, а вес  $\omega_s^{k+1}$  – минимально допустимым.

Количество распределений выбирается исходя из сложности фона и имеющихся вычислительных мощностей (в [2] предлагается использовать значение в пределах от 3 до 5).

Данный алгоритм был реализован в пакетном комплексе Matlab. Результатами являются следующие рисунки (рис. 1, а,б).

Выделение переднего плана (формирование маски изображения) не идеальный процесс. Можно наблюдать небольшое количество шума (рис. 1 (б)). Чтобы избежать появления ложных срабатываний, нужно удалить нежелательные шумы. Для этого была использована операция морфологического открытия.

Открытие (Opening) двоичного  $B$  на структурный элемент  $S$  записывается как  $B \circ S$  и определяется как [7]:

$$B \circ S = (B - S) \oplus S. \quad (12)$$

В результате получается очищенное изображение (рис.2). В конечном результате получается кадр с найденными движущимися объектами (рис.3). Зелеными квадратами отмечены обнаруженные движущиеся объекты.

По рисункам можно отметить, что алгоритм вычитания фона с использованием смеси Гауссовых распределений не может отделить движущиеся тени от объектов. Поэтому на рис. 3 вместе с объектом выделяется и область с тенью.



Рис. 2. Очищенное бинарное изображение



Рис. 3. Результат работы алгоритма



а)



б)



в)

Рис. 4. Результаты работы алгоритма вычитания фона при разных условиях:

а) «Нормальные условия»;

б) Условия ограниченной освещенности;

в) Неблагоприятные погодные условия

Было проведено исследование данного метода при различных условиях видеосъемки. При выборе видеороликов учитывались следующие требования: видео должно быть снято в разных окружающих условиях, в различное время суток. Результаты исследований представлены на рис.4, где зелеными прямоугольниками выделены обнаруженные движущиеся объекты.

По рис. 4 видно, что алгоритм вычитания фона с использованием смеси Гауссовых распределений не определил движение второй машины, которая только начала своё движение (а). Это объясняется латентностью в обновлении модели фона: должно пройти некоторое время, прежде чем в модели будут учтены изменения,

связанные с началом движения или остановкой объекта.

Алгоритм вычитания фона с использованием смеси Гауссовых распределений достаточно неэффективен в условиях ограниченной освещенности. Возникают ложные срабатывания: выделяются светлые области машин и освещенные участки дороги. Движение самих объектов не определяется (рис. 4,б).

Неблагоприятные погодные условия влияют на работу алгоритма вычитания фона. По рис. 4 (в) можно сказать, что падающий снег вызывает ложные срабатывания.

## Заключение

В данной работе рассматривался метод вычитания фона с использованием смеси Гауссовых распределений в задаче обнаружения движущегося объекта.

Данный метод относится к рекурсивным методам построения фонового изображения. То есть для обновления модели фона используются данные об интенсивностях пикселей только текущего кадра.

Главным преимуществом данного метода является то, что фоновое изображение моделируется с использованием нескольких гауссиан. За счет этого данный метод более точно и достоверно определяет движущиеся объекты, чем простые или нерекурсивные методы.

Однако, несмотря на это, алгоритм вычитания фона с использованием смеси Гауссовых распределений показывает неудовлетворительные результаты при появлении на видео падающего снега (который в данном случае считается шумом), но в меньшей степени, чем алгоритм вычитания фона, где используются нерекурсивные методы построения бинарного изображения. Также неудовлетворительные результаты были показаны в условиях ограниченной освещенности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Суй Лэй Исследование методов и алгоритмов обнаружения движущихся объектов в видеопотоке [Электронный ресурс] / [www.sntbul.bmstu.ru](http://www.sntbul.bmstu.ru) – официальный сайт Молодежного научно-технического вестника. Издатель ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н.Э.Баумана» / URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/568760.html> (дата обращения 15.09.2016)

2. Stauffer, C. Adaptive background mixture models for real-time tracking / Chris Stauffer, W. Eric L. Grimson // Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 23-25 June 1999. – Ft. Collins, CO, USA, 1999. – P. 2246-2252.
3. Bouwmans, T. Background Modeling using Mixture of Gaussians for Foreground Detection / Thierry Bouwmans, Fida El Baf, Bertrand Vachon // A Survey. Recent Patents on Computer Science, Bentham Science Publishers. – 2008. – V. 1 (3). – P.219-237.
4. Elgammal, A. Efficient Kernel Density Estimation Using the Fast Gauss Transform with Applications to Color Modeling and Tracking / A. Elgammal, R. Duraiswami, L.S. Davis // Patt Analysis and Machine Intelligence. IEEE Transactions. – 2003. – V. 25(11). – P.1499-1504.
5. Elhabian, S. Moving object detection in spatial domain using background removal techniques / S. Elhabian, K. El-Sayed, S. Ahmed // State-of-Art. Recent Pat on Computer Science. – 2008 – V. 1(1) – P.32-54.
6. El Baf, F. Comparison of background subtraction methods for a multimedia learning space / F. El Baf, T. Bouwmans, B. Vachon // Int Conf on Signal Processing and Multimedia (SIGMAP 2007). – Barcelona, July 2007. – P. 135-141.
7. Морфологические операции на бинарных изображениях [Электронный ресурс] / [www.wiki.technicalvision.ru](http://www.wiki.technicalvision.ru) - профессиональный Wiki ресурс «Техническое зрение» / URL: [http://wiki.technicalvision.ru/index.php/Морфологические операции на бинарных изображениях](http://wiki.technicalvision.ru/index.php/Морфологические_операции_на_бинарных_изображениях) (дата обращения 20.09.2016)

## MOVING OBJECTS DETECTION USING GAUSSIAN MIXTURE MODEL

A.N. Zalivin<sup>1</sup>, N.S. Balabanova<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Belgorod National Research University, Belgorod, Russia

**Abstract.** The problem of moving objects detection was set a long time ago, but due to its nature, it doesn't have a specific solution yet, because of the conditions of detection can be different. In this paper the method of background subtraction using a Gaussian mixture model is considered. Also this method is researched in different conditions, such as a presence of falling snow and limited-light conditions.

**Keywords:** moving objects detection, Gaussian mixture model, background subtraction.

## REFERENCES

1. Ley Syuy Research of methods and algorithms of moving objects detection in the video stream [Issledovanie metodov i algoritmov obnaruzheniya dvizhushchikhsya ob"ektov v videopotoke], *Molodezhnyy nauchno-tekhnicheskiiy vestnik [Youth Science and Technology Vestnik]*, 2013, no. 05 (available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/568760.html>)
2. Stauffer, C. Adaptive background mixture models for real-time tracking / Chris Stauffer, W. Eric L. Grimson // Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 23-25 June 1999. – Ft. Collins, CO, USA, 1999. – P. 2246-2252.
3. Bouwmans, T. Background Modeling using Mixture of Gaussians for Foreground Detection / Thierry Bouwmans, Fida El Baf, Bertrand Vachon // A Survey. Recent Patents on Computer Science, Bentham Science Publishers. – 2008. – V. 1 (3). – P.219-237.
4. Elgammal, A. Efficient Kernel Density Estimation Using the Fast Gauss Transform with Applications to Color Modeling and Tracking / A. Elgammal, R. Duraiswami, L.S. Davis // Patt Analysis and Machine Intelligence. IEEE Transactions. – 2003. – V. 25(11). – P.1499-1504.
5. Elhabian, S. Moving object detection in spatial domain using background removal techniques / S. Elhabian, K. El-Sayed, S. Ahmed // State-of-Art. Recent Pat on Computer Science. – 2008 – V. 1(1) – P.32-54.
6. El Baf, F. Comparison of background subtraction methods for a multimedia learning space / F. El Baf, T. Bouwmans, B. Vachon // Int Conf on Signal Processing and Multimedia (SIGMAP 2007). – Barcelona, July 2007. – P. 135-141.
7. *Morfologicheskie operatsii na binarnykh izobrazheniyakh* [Morphological operations on binary images]. Available at: <http://wiki.technicalvision.ru/index.php/> (accessed 20.09.2016)

## МОРФОЛОГИЧЕСКАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ПОЛУТОНОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ЛОКАЛЬНЫХ СТАТИСТИК

А.Е. Филатова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,  
Харьков, Украина

filatova@gmail.com

**Аннотация.** Работа посвящена решению задачи повышения качества визуализации рентгенологических изображений за счет морфологической фильтрации на основе локальных статистик. Показан морфологический характер фильтра Винера. Предложена модификация фильтра Винера за счет использования медианы и квантилей в качестве локальных статистик морфологического фильтра.

**Ключевые слова:** морфологическая фильтрация, локальные статистики, рентгенологическое изображение, фильтр Винера, медиана, квантиль.

### Актуальность работы

Большая часть медицинской информации, получаемая в результате инструментальных методов исследования, регистрируется в виде рентгеновских изображений, таких как маммограммы, флюорограммы, томограммы, рентгенограммы грудной клетки, конечностей и т.д. В медицинской практике при проведении рентгенологических исследований основной задачей является получение максимального количества диагностической информации при наименьшем радиационном риске, т.е. стремятся максимально уменьшить энергию ионизирующего излучения, а также время экспозиции.

От качества визуализации исследуемых органов и опорно-двигательного аппарата напрямую зависит точность и своевременность диагностики. В силу ряда причин (физико-технические параметры регистрации, свойства объекта, рентгенологический шум и другие факторы) качество рентгенологических изображений не соответствует предъявляемым требованиям. Поэтому задача повышения качества визуализации рентгенологических изображений за счет цифровой обработки изображений, в частности с помощью морфологического анализа, является актуальной научно-практической задачей.

### Анализ литературы

Существует два основных подхода к морфологическому анализу данных:

1) Алгебраический подход, который основан на реконструкции формы образа (изображения) в виде комбинации других (базовых) образов при помощи определенного набора операций (алгебры образов). Т.е. в качестве модели формы выступает «инструкция по сборке» образа из элементов.

2) Геометрический подход, который основан на таком описании формы, которое учитывает внутреннюю геометрию формы объектов. Здесь в качестве модели формы выступает описание связей между элементами образа (точками, пикселями, векторами, областями и т.д.). При этом модель представляется не алгебраической

комбинацией других образов, а матрицей отношений или графом связей между его элементами.

Исходя из указанных выше подходов, все методы морфологического анализа изображений можно разделить на два больших класса:

1) Проективные морфологии:

– морфология Серра [1];

– морфология Пытьева [2, 3];

– морфология, основанная на фильтрах, сохраняющих связность (connected filter) [4] и др.

2) Диффузная (непроективная) морфология [5, 6].

Морфология Серра (математическая морфология) основана на понятиях теории множеств и используется для морфологической фильтрации с учетом заданной формы. Эту форму задают структурирующие элементы. В математической морфологии заданы две базовые операции: дилатация (расширение) и эрозия (сжатие). На базовых операциях дилатации и эрозии определены базовые операторы размывания (открытия) и замыкания (закрытия). За счет комбинации базовых операций можно построить другие морфологические операции, например, сглаживание, морфологический градиент, морфологический фильтр Лапласа и др.

Иной подход заложен в морфологии Пытьева, которая используется для сравнения естественных изображений и сцен (поиск отличий между изображениями), сделанных в различных условиях съемки. Т.е. эта морфология инвариантна к изменениям яркости изображений (условиям получения изображений). Основная идея заключается в том, что для получения модели формы эталонное изображение сегментируется таким образом, что в результате получается набор непересекающихся связанных областей постоянной яркости, после чего вычисляется проекция анализируемого изображения на форму эталонного.

Еще один подход используется в проективной морфологии, основанной на фильтрах, сохраняющих связность. В отличие от морфологии Пытьева здесь используется уровневое разбиение. Связные области, получающиеся на разных уровнях, могут пересекаться и принадлежать друг другу.

Основная идея заключается в том, что вначале изображение представляется в виде объединения связанных областей, а затем эти области фильтруются (т.е. либо включаются, либо исключаются из описания изображения). При этом используется 2 типа фильтров:

1) реконструкция полных областей делается с использованием морфологии на основе структурирующих элементов;

2) реконструкция производится не на основе структурирующих элементов, а на основе правил анализа связанных областей по форме (т.е. на основе некоторых признаков).

Несмотря на отличия математических моделей, заложенных в проективные морфологии, все они имеют общие признаки:

а) форма, так или иначе, определяется как множество изображений, которое формируется по определенным правилам;

б) проективные морфологии используют алгебры с проекторами;

в) проекция – это комбинация операций сегментации (т.е. описания образа) с последующей реконструкцией по этому описанию.

В отличие от проективной морфологии диффузная морфология основана на описании формы способом, который учитывает внутреннюю геометрию точек. Т.е. тем или иным способом строится граф соседства, по которому вычисляются матрицы расстояний. В основе этой морфологии лежат такие понятия как диффузное ядро и диффузный оператор [7, 8]. При этом диффузный оператор не является проективным.

### Цель работы

Разработка метода морфологической фильтрации полутоновых изображений для решения задачи повышения качества визуализации биомедицинских рентгеновских изображений.

### Морфологическая фильтрация полутоновых изображений

В работе [6] предложен компаративный фильтр на основе взаимного контрастирования следующего вида:

$$\varphi_a^w(f, g)[x, y] = g_0^{w[x, y]}[x, y] + a(f, g^{w[x, y]})(g[x, y] - g_0^{w[x, y]}[x, y]), \quad (1)$$

где  $g_0^{w[x, y]}[x, y]$  – среднее значение изображения  $g[x, y]$  в окне  $w[x, y]$ ;  $a(f, g^{w[x, y]}) \in [0, 1]$  – локальный коэффициент взаимного сходства фрагмента изображения  $g^{w[x, y]}$  с элементами изображения  $f$ , такой, что  $a(g, g^{w[x, y]}) = 1$  и  $a(o, g^{w[x, y]}) = 0$ , если  $o[x, y] = const$ .

В качестве коэффициента  $a(f, g^{w[x, y]})$  могут использоваться:

– локальный нормированный коэффициент корреляции:

$$a(f, g^{w[x, y]}) = K(f^{w[x, y]}, g^{w[x, y]}) = \frac{(f^{w[x, y]} - f_0^{w[x, y]}, g^{w[x, y]} - g_0^{w[x, y]})}{\|f^{w[x, y]} - f_0^{w[x, y]}\| \|g^{w[x, y]} - g_0^{w[x, y]}\|},$$

где  $f_0^{w[x, y]}[x, y]$ ,  $g_0^{w[x, y]}[x, y]$  – средние значения изображений  $f[x, y]$  и  $g[x, y]$  в окне  $w[x, y]$  соответственно;

– поисковый коэффициент корреляции:

$$a(f, g^{w[x, y]}) = K_{\max} = \max_{[u, v] \in p[x, y]} K(f^{w[u, v]}, g^{w[x, y]}),$$

где  $p[x, y]$  – зона поиска соответствия фрагмента изображения  $g$  на эталоне  $f$ ;

– локальный морфологический коэффициент корреляции Пытьева:

$$a(f, g^{w[x, y]}) = K_M(f^{w[x, y]}, g^{w[x, y]}) = \frac{\|P_f(g^{w[x, y]} - g_0^{w[x, y]})\|}{\|g^{w[x, y]} - g_0^{w[x, y]}\|},$$

где  $P_f(g^{w[x, y]} - g_0^{w[x, y]})$  – проекция центрированного изображения  $g$  на форму эталонного изображения  $f$  в окне  $w[x, y]$ ;

– поисковый морфологический коэффициент корреляции Пытьева:

$$a(f, g^{w[x, y]}) = K_{(M)\max} = \max_{[u, v] \in p[x, y]} K_M(f^{w[u, v]}, g^{w[x, y]});$$

– «тепловые» ядра взаимного сходства фрагментов изображения на основе сравнения векторов локальных признаков вида:

$$a(f^{w[u, v]}, g^{w[x, y]}) = e^{-\frac{d_v(\vec{v}(f^{w[u, v]}), \vec{v}(g^{w[x, y]}))}{\varepsilon}},$$

где  $\vec{v}$  – вектор признаков пространства  $V$  с метрикой  $d_v$ ;  $\varepsilon$  – масштабный настроечный коэффициент;

– другие подобные меры сходства изображений.

С помощью компаративных фильтров вида (1) решается ряд задач, из которых можно выделить такие задачи как оценка сходства изображения по форме и выделение относительных изменений в сцене, поэтому такие фильтры являются морфологическими. Основное преимущество компаративных фильтров вида (1) заключается в том, что качество сравнения изображения по форме не зависит от качества сегментации, т.к. предварительная сегментация изображения не выполняется.

Независимо от такого, каким способом вычислен коэффициент  $a(f, g^{w[x, y]})$ , для применения фильтра (1) необходимо иметь эталонное изображение или модель формы, т.к. в [6] в качестве коэффициента  $a(f, g^{w[x, y]})$  используются различные локальные и поисковые коэффициенты геометрической корреляции форм. Поэтому для решения задачи повышения качества визуализации биомедицинских рентгенологических изображений такие фильтры непригодны, т.к. из-за высокой вариабельности форм объектов, которые могут анализироваться на рентгенологических снимках, невозможно задать эталонное изображение или модель формы.

В работах [10, 11] автором разработан метод повышения качества визуализации рентгенологических изображений, в основу которого положена декомпозиция изображения на составляющие, содержащие структуру и плотность тканей соответственно. При этом для вычисления оценки изображения, содержащего структуру тканей, необходимо удалить из исходного изображения неравномерность яркости, обусловленную различной толщиной тканей одного типа, т.е. выровнять интенсивность фона. Эта задача в [10] решается за счет вычисления модели фона с помощью фильтра Винера с большим размером апертуры, отклик которого определяется следующими выражениями:

$$\varphi[x, y] = \mu[x, y] + K(g^{w[x,y]}) (g[x, y] - \mu[x, y]), \quad (2)$$

$$K(g^{w[x,y]}) = \begin{cases} \frac{(\sigma[x, y])^2 - v^2}{(\sigma[x, y])^2}, & \text{если } (\sigma[x, y])^2 > v^2; \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (3)$$

где  $\mu[x, y]$ ,  $(\sigma[x, y])^2$  – локальное среднее и локальная дисперсия изображения  $g[x, y]$  в окне  $w[x, y]$ ;  $v^2$  – дисперсия шума.

Если дисперсия шума неизвестна, то она вычисляется как среднее значение локальных дисперсий изображения  $g[x, y]$ :

$$v^2 = \frac{1}{M_1 M_2} \sum_{x,y} (\sigma[x, y])^2, \quad (4)$$

где  $M_1$ ,  $M_2$  – размеры изображения  $g[x, y]$ .

Покажем морфологический характер фильтра (2). Очевидно, что в выражениях (1) и (2)  $g_0^{w[x,y]}[x, y] = \mu[x, y]$ . Легко заметить, что  $K(g^{w[x,y]}) = 0$ , если  $g[x, y] = o[x, y]$  или сигнал  $g[x, y]$  не содержит полезного сигнала, а лишь шумовую составляющую, т.е.  $(\sigma[x, y])^2 \leq v^2$ . При этом  $K(g^{w[x,y]}) = 1$ , если изображение  $g[x, y]$  не содержит шум, т.е.  $v^2 = 0$ . Таким образом, коэффициент  $K(g^{w[x,y]}) \in [0, 1]$ , и его свойства аналогичны свойствам коэффициента  $a(f, g^{w[x,y]})$ .

Следовательно, фильтр Винера, отклик которого определяется выражениями (2)-(4), по сути, является морфологическим фильтром. При этом модель формы задается не явно, а косвенно за счет вычисления локальных статистик сигнала, попавшего в окно фильтра. Таким образом, форма полезного сигнала в окне определяется законом распределения яркостей пикселей, попавших в окно морфологического фильтра. В фильтре Винера в качестве таких статистик используются локальное среднее  $\mu[x, y]$ , локальная дисперсия  $(\sigma[x, y])^2$  фильтруемого изображения, а также дисперсия шума  $v^2$ .

Однако такие статистики корректно использовать, если предполагается, что закон распределения яркостей пикселей, попавших в окно, подчиняется закону Гаусса. Для реальных сигналов закон распределения яркостей пикселей неизвестен, а при относительно малых размерах окна фильтра предположение о нормальном законе распределения яркостей пикселей фильтруемого сигнала может быть некорректным. Поэтому предлагается

использовать такие локальные статистики, вычисление которых не требует знание закона распределения случайной величины. В данной работе предлагается использовать соответствующие локальные квантили, которые определяются по локальной выборке, т.е. по значениям пикселей, попавших в окно фильтра. Тогда отклик предлагаемого морфологического фильтра определяется следующими выражениями:

$$\varphi_m[x, y] = q_{0.5}[x, y] + K_m(g^{w[x,y]}) (g[x, y] - q_{0.5}[x, y]), \quad (5)$$

$$K_m(g^{w[x,y]}) = \begin{cases} \frac{\Delta q[x, y] - \Delta q_{cp}}{\Delta q[x, y]}, & \text{если } \Delta q[x, y] > \Delta q_{cp}; \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (6)$$

$$\Delta q[x, y] = q_b[x, y] - q_a[x, y], \quad (7)$$

$$\Delta q_{cp} = \frac{1}{M_1 M_2} \sum_{x,y} \Delta q[x, y], \quad (8)$$

где  $q_{0.5}[x, y]$  – локальная медиана изображения  $g[x, y]$  в окне  $w[x, y]$ ;  $q_a[x, y]$ ,  $q_b[x, y]$  – локальные  $a$ -квантиль и  $b$ -квантиль изображения  $g[x, y]$  в окне  $w[x, y]$ , причем  $a < b$ .

Назовем фильтр, отклик которого определяется выражениями (5)-(8), морфологическим фильтром (МФ) на основе локальных статистик (ЛС).

### Экспериментальные исследования

В качестве тестового изображения возьмем изображение  $g[x, y]$  белого квадрата на сером фоне, изображенное на рис. 1,а. Для иллюстрации работы МФ на основе ЛС выполнена фильтрация тестового изображения  $g[x, y]$  с различными значениями локальных квантилей  $a$  и  $b$  в выражении (7), а также выполнена фильтрация с помощью фильтра Винера согласно выражениям (2)-(4) и медианного фильтра (см. рис. 1). Параметры изображений приведены в табл. 1.

Для всех фильтров линейные размеры апертуры составили 51 пиксель, что значительно превышает размеры объекта на тестовом изображении. Т.к. линейные размеры апертуры превышают размеры квадрата на тестовом изображении, то в результате медианной фильтрации белый квадрат полностью исчезает с тестового изображения после фильтрации (см. рис. 1,е). Легко заметить, что после применения фильтра Винера форма квадрата не искажается, однако вокруг квадрата появляется артефакт в виде светло-серого ореола (см. рис. 1,б). После применения МФ на основе ЛС артефакт в виде светло-серого ореола отсутствует (см. рис. 1,в-д), однако при значениях квантилей  $a = 0.3$ ,  $b = 0.7$  форма квадрата получилась искаженной (см. рис. 1,д). При этом легко заметить, что чем меньше выбрано межквантильное расстояние в (7), тем светлее будет изображение квадрата при неизменном значении фона, т.е. изображение после фильтрации получается более контрастным.

Сравним результаты фильтрации рассматриваемыми фильтрами после наложения на тестовое изображение различного вида помех. Во всех экспериментах линейные размеры апертуры – 51 пиксель. На рис. 2. представлены тестовое изображение с импульсной помехой и результаты фильтрации фильтром Винера, МФ

Параметры тестового изображения и изображений после фильтрации различными фильтрами

Изображение	Размеры $g[x, y]$	Размеры квадрата	$\min(g[x, y])$	$\max(g[x, y])$
Рис. 1,а	150x150	30x30	1000	4095
Рис. 1,б	150x150	30x30	1000	3796
Рис. 1,в	150x150	30x30	1000	2730,7
Рис. 1,г	150x150	30x30	1000	3471,9
Рис. 1,д	150x150	30x30	1000	3633,8
Рис. 1,е	150x150	30x30	1000	1000

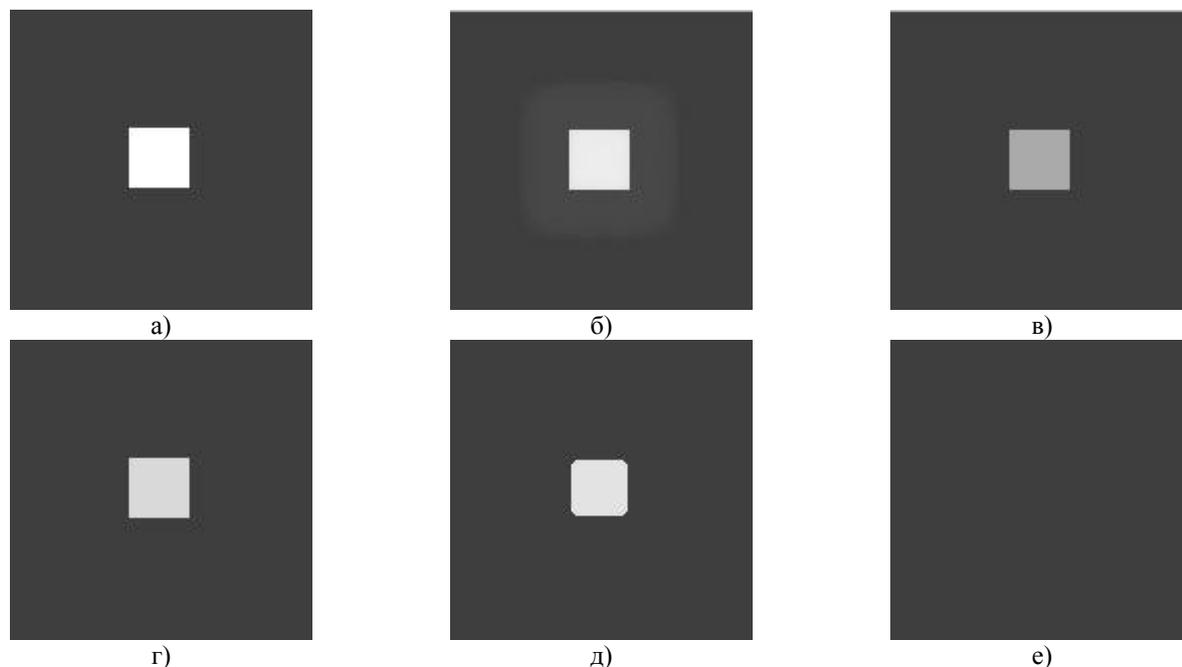


Рис. 1. Тестовое изображение: а) исходное; б) после фильтрации фильтром Винера; в) после фильтрации МФ на основе ЛС с  $a=0.05$  и  $b=0.95$ ; г) после фильтрации МФ на основе ЛС с  $a=0.25$  и  $b=0.75$ ; д) после фильтрации МФ на основе ЛС с  $a=0.3$  и  $b=0.7$ ; е) после медианной фильтрации

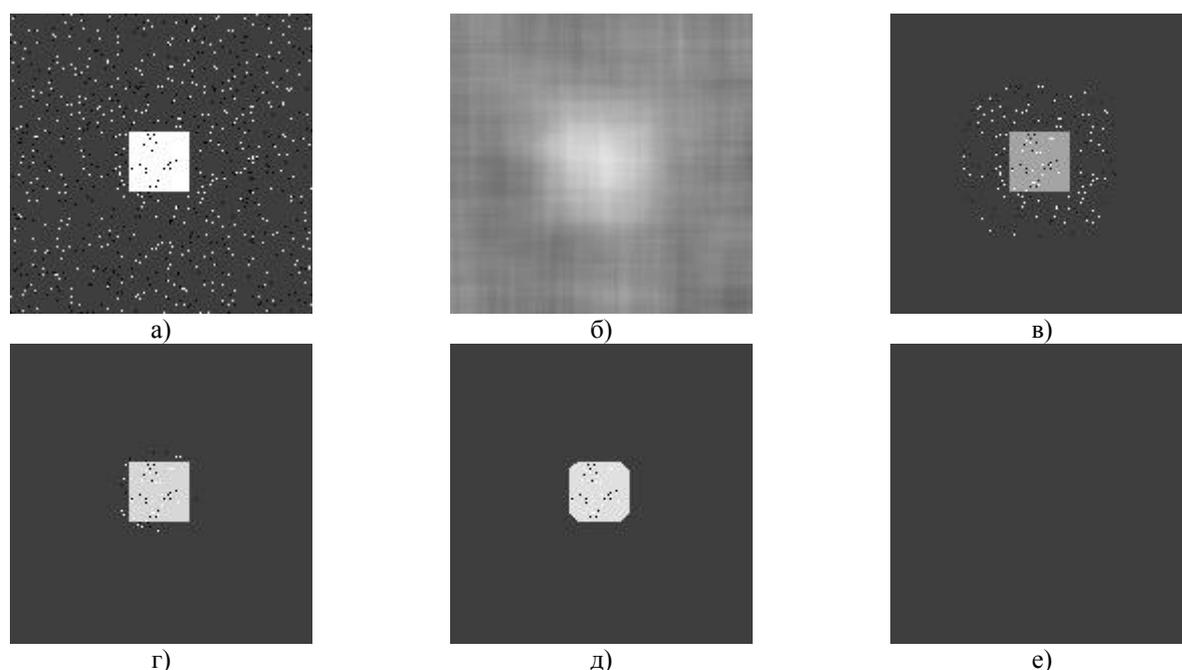
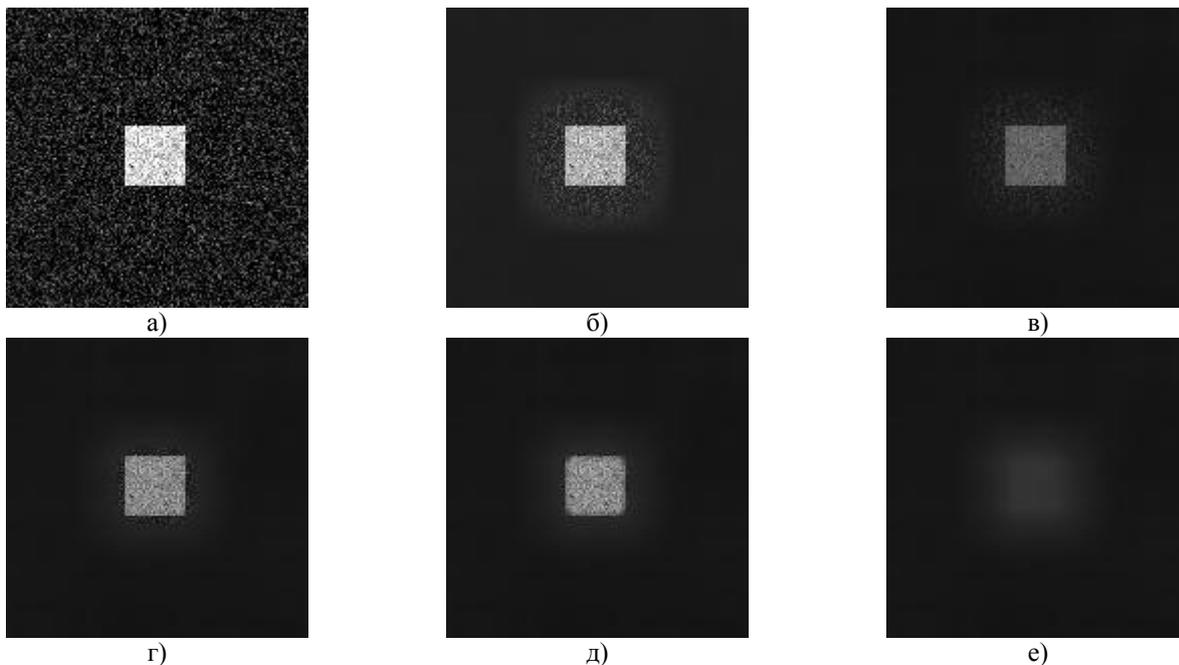
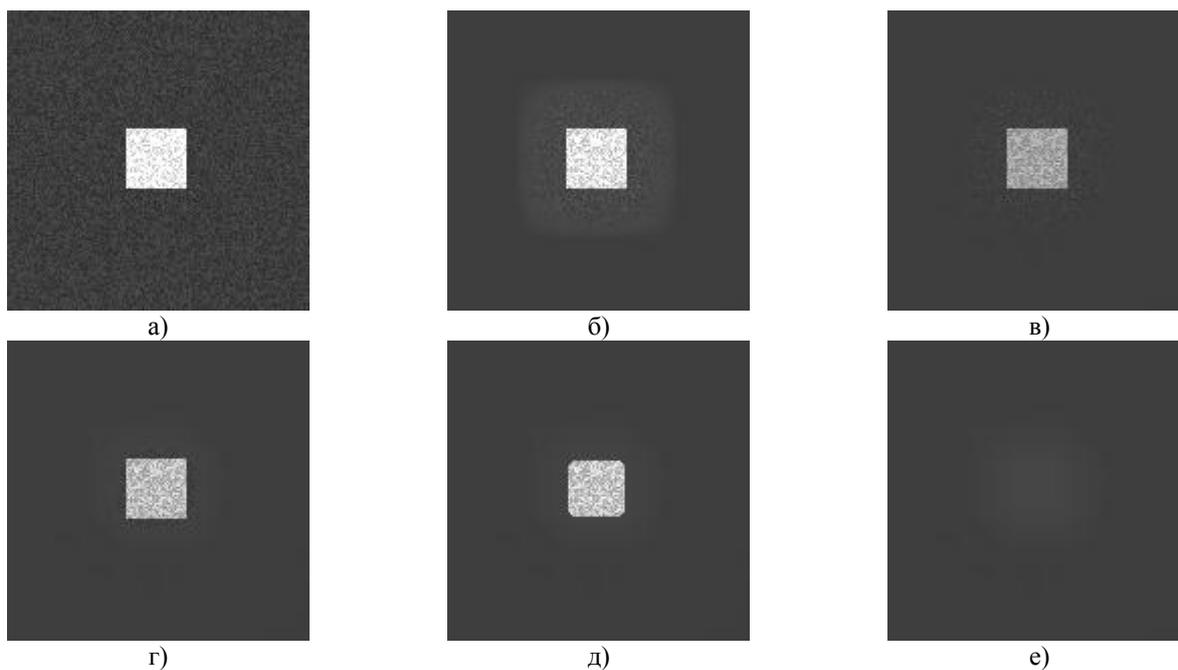


Рис. 2. Тестовое изображение: а) исходное изображение, искаженное импульсной помехой; б) после фильтрации фильтром Винера; в) после фильтрации МФ на основе ЛС с  $a=0.05$  и  $b=0.95$ ; г) после фильтрации МФ на основе ЛС с  $a=0.25$  и  $b=0.75$ ; д) после фильтрации МФ на основе ЛС с  $a=0.3$  и  $b=0.7$ ; е) после медианной фильтрации



**Рис. 3. Тестовое изображение: а) исходное изображение, искаженное случайной аддитивной помехой; б) после фильтрации фильтром Винера; в) после фильтрации МФ на основе ЛС с  $a = 0.05$  и  $b = 0.95$ ; г) после фильтрации МФ на основе ЛС с  $a = 0.25$  и  $b = 0.75$ ; д) после фильтрации МФ на основе ЛС с  $a = 0.3$  и  $b = 0.7$ ; е) после медианной фильтрации**



**Рис. 4. Тестовое изображение: а) исходное изображение, искаженное случайной мультипликативной помехой; б) после винеровской фильтрации; в) после фильтрации МФ на основе ЛС с  $a = 0.05$  и  $b = 0.95$ ; г) после фильтрации МФ на основе ЛС с  $a = 0.25$  и  $b = 0.75$ ; д) после фильтрации МФ на основе ЛС с  $a = 0.3$  и  $b = 0.7$ ; е) после медианной фильтрации**

на основе ЛС с различными параметрами и медианным фильтром. Легко заметить, что только после фильтрации МФ на основе ЛС на тестовом изображении светлый квадрат не изменил своей формы (см. рис. 2,в,г) или изменил незначительно (см. рис. 2,д). При этом фильтр Винера полностью размывает объект на тестовом изображении (см. рис. 2,б), а медианный фильтр полностью удаляет объект с тестового изображения (см. рис. 2,е).

На рис. 3. представлены тестовое изображение со случайной аддитивной помехой, распределенной по закону Гаусса, и результаты фильтрации фильтром Винера, МФ на основе ЛС с различными параметрами и медианным фильтром. В отличие от предыдущего случая светлый квадрат не изменил своей формы не только после фильтрации МФ на основе ЛС на тестовом изображении (см. рис. 3,в-д), но и после винеровской фильтрации (см. рис. 3,б).

Однако на рис. 3,б наблюдается значительное искажение фона вокруг квадрата. В результате медианной фильтрации на изображении можно увидеть лишь слабые очертания объекта на тестовом изображении (см. рис. 3,е).

На рис. 4. представлены тестовое изображение, искаженное случайной мультипликативной помехой, и результаты фильтрации фильтром Винера, МФ на основе ЛС с различными параметрами и медианным фильтром.

Аналогично случаю с аддитивной помехой светлый квадрат не изменил своей формы как после винеровской фильтрации (см. рис. 4,б), так и после применения МФ на основе ЛС (см. рис. 4,в-д). При этом после применения фильтра Винера, как и в предыдущем случае, наблюдаются артефакты в виде ореола вокруг объекта, медианная фильтрация полностью удаляет объект, оставляя лишь артефакт в виде слабо различимого размытого пятна (4,е).

Таким образом, независимо от типа помехи (импульсной или случайно) и способа ее наложения (аддитивная или мультипликативная) морфологический фильтр на основе локальных статистик показал лучшие результаты по сравнению с фильтром Винера и медианным фильтром.

### Выводы

В работе решена актуальная научно-практическая задача разработки морфологического фильтра на основе локальных статистик, который позволяет без необходимости знания закона распределения полезного сигнала, а также типа помехи и способа ее наложения выполнять фильтрацию полутонового изображения без искажения формы объекта. Разработанный морфологический фильтр может быть использован для решения задачи повышения качества визуализации биомедицинских рентгенологических изображений.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Грузман И.С. Цифровая обработка изображений в информационных системах: Учебное пособие / И.С. Грузман, В.С. Киричук, В.П. Косых, Г.И. Перетягин, А.А. Спектор. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 352 с.

2. Пытьев Ю.П. Методы морфологического анализа изображений / Ю.П. Пытьев, А.И. Чуличков. – М.: Физматлит, 2010. – 336 с.
3. Пытьев Ю.П. Косые проекторы и относительные формы в морфологии / Ю.П. Пытьев // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2013. – № 53 (12). – С. 2100-2122.
4. Salembier P. Flat Zones Filtering, Connected Operators, and Filters by Reconstruction / P. Salembier, J. Serra // IEEE Transactions on Image Processing. – 1995. – Vol. 4, NO. 8. – P. 1153-1160.
5. Визильтер Ю.В. Сравнение изображений по форме с использованием диффузной морфологии и диффузной корреляции / Ю.В. Визильтер, В.С. Горбачевич, А.Ю. Рубис, О.В. Выголов // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 2. – С. 265-274.
6. Лебедев М.А. Выделение отличий на мозаичных изображениях на основе референтных фильтров / М.А. Лебедев, А.Ю. Рубис, В.С. Горбачевич, Ю.В. Визильтер, О.В. Выголов // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 1. – С. 80-86.
7. Coifman R. Geometries of sensor outputs, inference and information processing / R. Coifman, S. Lafon, M. Maggioni, Y. Keller, A.D. Szlam, F. Warner, S. Zucker // Storage and Retrieval for Image and Video Databases, edited by Intelligent Integrated Microsystems. – 2006. – Vol. 6232. – P. 623-209.
8. Coifman R. Diffusion maps / R. Coifman, S. Lafon // Applied and Computational Harmonic Analysis. – 2006. – Vol. 21 (1). – P. 5-30.
9. Рубис А.Ю. Морфологическая фильтрация изображений на основе взаимного контрастирования / А.Ю. Рубис, М.А. Лебедев, Ю.В. Визильтер, О.В. Выголов // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 1. – С. 73-79.
10. Филатова А.Е. Метод повышения качества визуализации рентгенологических изображений / А.Е. Филатова, Д.А. Бойко. – Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – № 32 (1141). – С. 19-26.
11. Филатова А.Е. Компенсация краевых эффектов в методе повышения качества визуализации рентгенологических изображений / А.Е. Филатова. – Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – № 33 (1142). – С. 167-174.

## MORPHOLOGICAL FILTERING OF GRAYSCALE IMAGES BASED ON LOCAL STATISTICS

A.E. Filatova

National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Kharkov, Ukraine

**Abstract.** The work is dedicated to the task of improving the quality of visualization of radiological images by morphological filtering based on local statistics. The morphological character of the Wiener filter is shown. Modification of the Wiener filter by using median and quantiles as local statistics of morphological filter is suggested.

**Keywords:** morphological filtering, local statistics, radiological image, Wiener filter, median, quantile.

### REFERENCES

1. Gruzman I.S., Kirichuk V.S., Kosykh V.P., Peretyagin G.I., Spector A.A. *Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy v informatsionnykh sistemakh: Uchebnoe posobie* [Digital Image Processing in Information Systems: Study Guide], Novosibirsk, Izdatel'stvo NGTU, 2002, 352 p.
2. Pyt'yev Yu.P., Chulichkov A.I. *Metody morfologicheskogo analiza izobrazheniy* [Methods of Morphological Image Analysis], Moscow, Fizmatlit, 2010, 336 p.

3. Pyt'yev Yu.P. Oblique Projectors and Relative Forms in Morphology [Kosye proektory i otnositel'nye formy v morfologii], *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki* [Computational Mathematics and Mathematical Physics Journal], 2013, № 53 (12), pp. 2100-2122.
4. Salembier P., Serra J. Flat Zones Filtering, Connected Operators, and Filters by Reconstruction [IEEE Transactions on Image Processing], 1995, Vol. 4, NO. 8, pp. 1153-1160.
5. Vizil'ter Yu.V., Gorbatshevich V.S., Rubis A.Yu., Vygolov O.V. Image Shape Matching Using Diffusion Morphology and Diffusion Correlation [Sravnenie izobrazheniy po forme s ispol'zovaniem diffuznoy morfologii i diffuznoy korrelyatsii], *Komp'yuternaya optika* [Computer Optics], 2015, Vol. 39, № 2, pp. 265-274.
6. Lebedev M.A., Rubis A.Yu., Gorbatshevich V.S., Vizil'ter Yu.V., Vyglov O.V. Change Detection in Segmented Images Based on Reference Filters [Vydelenie otlichnykh na mozaichnykh izobrazheniyakh na osnove referentnykh fil'trov], *Komp'yuternaya optika* [Computer Optics], 2016, Vol. 40, № 1, pp. 80-86.
7. Coifman R., Lafon S., Maggioni M., Keller Y., Szlam A.D., Warner F., Zucker S. Geometries of sensor outputs, inference and information processing [Storage and Retrieval for Image and Video Databases, edited by Intelligent Integrated Microsystems], 2006, Vol. 6232, pp. 623-209.
8. Coifman R., Lafon S. Diffusion maps [Applied and Computational Harmonic Analysis], 2006, Vol. 21 (1), pp. 5-30.
9. Рубис А.Ю., Лебедев М.А., Визильтер Ю.В., Выголов О.В. Morphological Image Filtering Based on Guided Contrasting [Morfologicheskaya fil'tratsiya izobrazheniy na osnove vzaimnogo kontrastirovaniya], *Komp'yuternaya optika* [Computer Optics], 2016, Vol. 40, № 1, pp. 73-79.
10. Filatova A.E., Boyko D.A. Method of improving the quality of radiographic image visualization [Metod povysheniya kachestva vizualizatsii rentgenologicheskikh izobrazheniy], *Vestnik NTU «KhPI»*, Seriya: Informatika i moelirovanie [Herald of the National Technical University «KhPI», Subject issue: Information Science and Modelling], Kharkov, NTU «KhPI», 2015, № 32 (1141), pp. 19-26.
11. Filatova A.E. Compensation of Edge Effects in the Method of Improving the Quality of Radiographic Image Visualization [Kompensatsiya kraevykh effektiv v metode povysheniya kachestva vizualizatsii rentgenologicheskikh izobrazheniy] *Vestnik NTU «KhPI»*, Seriya: Informatika i moelirovanie [Herald of the National Technical University «KhPI», Subject issue: Information Science and Modelling], Kharkov, NTU «KhPI», 2015, № 33 (1142), pp. 167-174.

УДК 669.041

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ, СОЗДАВАЕМОГО ДУГОВЫМИ  
СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫМИ ПЕЧАМИ ТРЕХФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

**Е.М. Костылева**

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия

[ezaretskaya@yandex.ru](mailto:ezaretskaya@yandex.ru)

**Аннотация.** Разработана математическая модель и компьютерная программа для определения напряженности магнитного поля вблизи трех параллельно горящих дуг трехфазного переменного тока. Посредством компьютерного моделирования установлено, что значение модуля напряженности магнитного поля вблизи трех параллельно горящих дуг трехфазного переменного тока прямо пропорционально току, проходящему через дуги и обратно пропорционально квадрату расстояния от центра распада электродов. Получена упрощенная инженерная формула для нахождения модуля напряженности магнитного поля вблизи существующих дуговых печей емкостью от 0,5 т до 200 т по жидкому металлу.

**Ключевые слова:** напряженность магнитного поля, трехфазный переменный ток, ток дуги, дуговая сталеплавильная печь, диаметр распада электродов.

**Актуальность работы**

Электромагнитные поля, создаваемые токами в дуговых печах, воздействуют на приборы и человека, влияют на поведение электрических дуг и течение расплава, а значит на его перемешивание и процессы тепломассообмена. Кроме этого, взаимодействие магнитного поля с током дуги является одной из причин возникновения резких и сильных звуковых колебаний. Наиболее сложные электромагнитные поля наблюдаются вблизи трехфазных дуговых печей переменного тока, в которых напряженность магнитного поля определяется суперпозицией магнитных полей от трех дуг, причем токи дуг сдвинуты по фазе. Величина и направление вектора результирующего магнитного поля зависят от ряда факторов: от времени, от расположения точки вблизи токоподводов и дуг в которой ищется напряженность магнитного поля, от диаметра распада электродов. Отсюда изучение магнитных полей вблизи дуговых печей трехфазного переменного тока является важной теоретической и практической задачей.

**Основные проблемы и решения**

Было предположено, что электрические дуги трехфазного переменного тока представляют собой три цилиндрических электрода радиуса  $r$ , и длиной  $L$ , причем в эту длину может входить и длина токоподводящих электродов, например графитированных электродов трехфазной дуговой печи. Электроды в дуговой печи расположены под углом  $120^\circ$  друг к другу в вершинах равностороннего треугольника.  $D_p = 2r_p$ , где  $D_p$  – диаметр распада электродов, то есть диаметр окружности, на которой расположены оси электродов,  $r_p$  – радиус окружности, на

которой расположены оси электродов. Учитываются магнитные поля только от токов, протекающих через цилиндрические электроды, по которым протекают переменные синусоидальные токи  $i_j = i_0 \sin(2\pi\nu\tau + \varphi_j)$  [1] где  $\tau$  - время,  $i_0$  - амплитуда тока,  $\nu = 50$  Гц,  $\varphi_j = 2\pi(j-1)/3; j=1, 2, 3$ .

Картина напряженности магнитного поля меняется во времени. Считалось, что для мгновенных значений токов в электродах образуемые ими магнитные поля будут стационарными. Было принято, что для токов промышленной частоты индуцированные токи, по сравнению с токами проводимости, малы [2], свободные заряды отсутствуют  $q_e = 0$ , поэтому токами смещения  $\partial \vec{D} / \partial \tau$  можно пренебречь, то есть поле является квазистационарным. Поле, созданное током, проходящим через  $j$  - электрод в точке  $A$  на расстоянии  $a_j$  от оси электрода описывается уравнением:

$$\oint_L H_j dl = I_j. \tag{1}$$

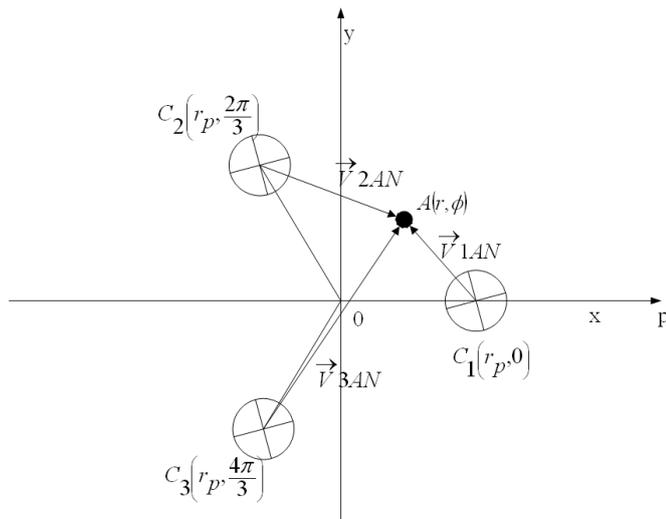
В качестве контура  $L$  целесообразно выбрать окружность радиуса  $a_j$ . Ввиду симметрии поле  $H_\varphi$  имеет одинаковую абсолютную величину во всех точках этой окружности, поэтому криволинейный интеграл (2.7) можно записать как  $2\pi a_j H_j = I_j$ , откуда поле в точке  $A$ :

$$H_j = \frac{i_0 \sin(2\pi\nu t + \varphi_j)}{2\pi a_j}.$$

Для нахождения результирующего поля в произвольной точке пространства  $A$  от токов, проходящих через три

параллельных электрода, используется принцип суперпозиции магнитных полей. Для этого находятся векторы напряженности магнитных полей, вызываемых токами в каждом электроде, а затем находим результирующую сумму векторов.

Выбрана полярная система координат относительно центра распада электродов. Центры первого, второго и третьего электрода имеют координаты  $C_1(r_p, 0)$ ,  $C_2(r_p, \frac{2\pi}{3})$  и  $C_3(r_p, \frac{4\pi}{3})$  соответственно. Необходимо определить напряженность магнитного поля в произвольной точке  $A(r, \phi)$ . Схематическое расположение графитированных электродов и точки  $A$  представлено на рис. 1.



**Рис. 1. Выбор полярной и декартовой системы координат и расположение векторов, нормальных к направлению векторов напряженности**

Для удобства нахождения суммы векторов перейдем в декартову систему координат. Направление оси  $Ox$  выбрано совпадающим с направлением полярной оси ( $\phi=0$ ). В декартовой системе координаты центров электродов и точки  $A$  будут выражены следующим образом [3-6]:

$$C_1(r_p, 0) = C_1(x_{C1}, y_{C1}) C_2\left(-\frac{r_p}{2}, \frac{r_p \cdot \sqrt{3}}{2}\right) = C_2(x_{C2}, y_{C2})$$

$$C_3\left(-\frac{r_p}{2}, -\frac{r_p \cdot \sqrt{3}}{2}\right) =$$

$$= C_3(x_{C3}, y_{C3}) C_A(r \cos \phi, r \sin \phi) =$$

$$= C_A(x_{CA}, y_{CA})$$

Векторы перпендикулярные направлениям векторов напряженности в точке  $A$  и их координаты определяем по формуле:

$$\vec{V}_{ANj} = \vec{V}_{ANj}(x_{CA} - x_{Cj}, y_{CA} - y_{Cj}), \quad (3)$$

где  $j=1, 2, 3$ .

Для нахождения координат векторов совпадающих с направлением напряженности магнитного поля в точке  $A$  следует поменять местами координаты векторов  $\vec{V}_{ANj}$  и у одной из этих координат поменять знак. Так как положительное направление вектора напряженности определяется по направлению против хода часовой стрелки, то с противоположным знаком берется абсцисса. Координаты векторов коллинеарные векторам напряженности в точке  $A$  находятся по формуле:

$$\vec{V}_{Aj} = (-y_{CA} + y_{Cj}, x_{CA} - x_{Cj}) \quad (4)$$

и соответственно координаты единичных векторов совпадающих по направлению с напряженностями магнитного поля от поля  $j$  электрода в точке  $A$ :

$$\vec{V}_{Aj} e_0 = \vec{V}_{Aj} e_0 \left( \frac{-y_{CA} + y_{Cj}}{\sqrt{(-y_{CA} + y_{Cj})^2 + (x_{CA} - x_{Cj})^2}}, \frac{x_{CA} - x_{Cj}}{\sqrt{(-y_{CA} + y_{Cj})^2 + (x_{CA} - x_{Cj})^2}} \right)$$

Координаты векторов напряженности в точке  $A$  определяются по формуле:

$$\vec{H}_{Aj} = \vec{H}_{Aj}((-y_{CA} + y_{Cj}) \cdot b, (x_{CA} - x_{Cj}) \cdot b), \quad (5)$$

где  $j=1, 2, 3$  - номер электрода,

$$b = \frac{i_0 \cdot \sin(2\pi vt + \phi_j)}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{((-y_{CA} + y_{Cj})^2 + (x_{CA} - x_{Cj})^2)} \cdot a_j}$$

Так как

$(-y_{CA} + y_{Cj})^2 + (x_{CA} - x_{Cj})^2 = (x_{CA} - x_{Cj})^2 + (y_{CA} - y_{Cj})^2 = a_j^2$ , то получаем выражение для нахождения координат векторов напряженности в точке  $A$ :

$$\vec{H}_{Aj} = \vec{H}_{Aj}((-y_{CA} + y_{Cj}) \cdot d, (x_{CA} - x_{Cj}) \cdot d), \quad (6)$$

$$\text{где } d = \frac{i_0 \cdot \sin(2\pi vt + \phi_j)}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{((-y_{CA} + y_{Cj})^2 + (x_{CA} - x_{Cj})^2)}}.$$

Результирующая напряженность магнитного поля в точке  $A$  от действия трех токов, проходящих через графитированные электроды

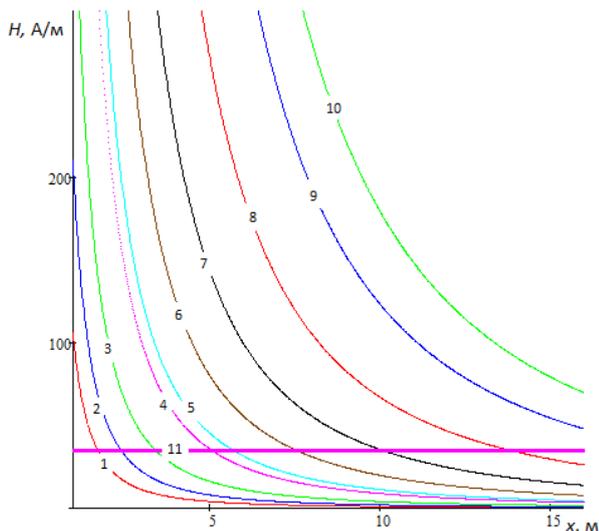
$$\vec{H}_A = \vec{H}_A(x_{H1} + x_{H2} + x_{H3}, y_{H1} + y_{H2} + y_{H3}). \quad (7)$$

На основе математической модели в среде разработки и моделирования *MatLab* создан программный модуль [7], позволяющий определять магнитные поля вблизи трех электродов, по которым протекает трехфазный переменный ток. На рис. 2. приведены результаты компьютерного моделирования. Показаны зависимости модуля напряженности магнитного поля от расстояния до центра распада электродов для условий работы трехфазных дуговых печей емкостью от  $m=0,5 - 200$  т (при  $\phi=\pi/4$ ,  $t=T/5$ ). Видно, что для каждой печи расстояние от центра распада электродов до точки, в которой напряженность магнитного поля сравнима с напряженностью магнитного поля Земли зависит от мгновенного значения тока и диаметра распада электродов. Обработка результатов расчетов для разных печей показала, что напряженность магнитного поля близка к зависимости обратно пропорциональной квадрату расстояния. Для инженерных расчетов на основе этих данных была получена регрессионная зависимость напряженности магнитного поля от мгновенного значения тока  $i_0$ , диаметра распада электродов  $d_p$  и расстояния до центра распада

электродов  $x$ :

$$H = (-0,037 \cdot d_p^2 + 0,191 \cdot d_p - 0,024) \cdot i_0 / x^2. \quad (8)$$

Данная зависимость справедлива при  $i_0=1680$ – $87000$  А,  $d_p=0,5$ – $1,7$  м и  $x=1$ – $16$  м.



**Рис.2.** Зависимость напряженности печи магнитного поля от расстояния до центра распада электродов для печей трехфазного переменного тока: 1 –  $m=0,5$  т,  $i_0=1680$  А,  $d_p=0,5$  м; 2 –  $m=1,5$  т,  $i_0=3200$  А,  $d_p=0,52$  м; 3 –  $m=3$  т,  $i_0=4800$  А,  $d_p=0,7$  м; 4 –  $m=6$  т,  $i_0=8220$  А,  $d_p=0,9$  м; 5 –  $m=10$  т,  $i_0=10400$  А,  $d_p=0,9$  м; 6 –  $m=12$  т,  $i_0=16500$  А,  $d_p=1$  м; 7 –  $m=25$  т,  $i_0=23500$  А,  $d_p=1,25$  м; 8 –  $m=50$  т,  $i_0=34600$  А,  $d_p=1,6$  м; 9 –  $m=100$  т,  $i_0=63600$  А,  $d_p=1,6$  м; 10 –  $m=200$  т,  $i_0=87000$  А,  $d_p=1,7$  м; 11 – значение напряженности магнитного поля Земли

### Выводы

Таким образом, предложена математическая модель и компьютерная программа для определения напряженности магнитного поля вблизи трех параллельно горящих дуг трехфазного переменного тока.

Посредством компьютерного моделирования получено, что значение модуля напряженности магнитного поля вблизи трех параллельно горящих дуг трехфазного переменного тока прямо пропорционально току,

проходящему через дуги и обратно пропорционально квадрату расстояния от центра распада электродов. Для инженерных расчетов получена упрощенная регрессионная зависимость для нахождения напряженности магнитного поля вблизи трех параллельно горящих дуг трехфазного переменного тока.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Вочке И. Электрическая плавильная печь: Пер. с нем. / Под ред. А.Н. Соколова. - Ленинград; М: Онти. Глав. ред. лит-ры по черной металлургии, 1936. - 540 с.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М., Наука, 1982. - 620 с.
3. Ячиков И.М. Характер магнитного поля вблизи графитированных электродов ДСП / Ячиков И.М., Зарецкая Е.М. // Современные проблемы электрометаллургии стали: материалы XIV Международной конференции/под редакцией В.Е. Рошина – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. - Ч. 2. – С. 148-154.
4. Ячиков И.М. Характер магнитного поля вблизи графитированных электродов ДСП/ Ячиков И.М., Зарецкая Е.М. // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 69-ой научно-технической конференции. –Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011.-Т.2. С 13-15.
5. Ячиков И.М. Моделирование магнитного поля вблизи графитированных электродов ДСП / Ячиков И.М. Зарецкая Е.М.// Приложение математики в экономических и технических исследованиях. Вып. 3: сб. научных трудов под ред. М.В. Бушмановой. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. Гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. - С. 41-46.
6. Ячиков И.М. Анализ поведения магнитного поля вблизи электродов дуговых печей посредством математического моделирования / Ячиков И.М., Зарецкая Е.М.// Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. - 2011, №1. - С. 18-20.
7. Ячиков И.М. Расчет электромагнитных сил, действующих на дуги в трехфазной дуговой печи/ Ячиков И.М., Костылева Е.М., Храмшин В.Р. // Свидетельство о государственной регистрации программы №2016618499 от 01 августа 2016.

## MATHEMATICAL MODELING OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD GENERATED BY THE ELECTRIC ARC STEELMAKING FURNACES, THREE-PHASE AC

**E.M. Kostyleva**

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

[ezaretskaya@yandex.ru](mailto:ezaretskaya@yandex.ru)

**Abstract.** The mathematical model and the computer program are developed for determining the magnetic field strength near three arcs burning in the parallel three-phase AC. Through computer modeling it is established that the value of the modulus of

---

magnetic field intensity near three arcs burning in parallel three-phase alternating current directly proportional to the current passing through the arc and inversely proportional to the square of the distance from the center of electrodes. Engineering obtained a simplified formula for finding the module of the magnetic field in close proximity to existing arc furnaces with capacity from 0.5 tons to 200 tons of liquid metal.

**Keywords:** the magnetic field, three-phase alternating current, arc current, arc furnace, diameter of electrodes

#### REFERENCES

1. Vochke I. *Elektricheskaya staleplavil'naya* [pech"The electric arc furnace]. Per. s nem. / Pod red. A.N. Sokolova. Leningrad; M: Onti. Glav. red. lit-ry po chernoy metallurgii, 1936, 540 p.
2. Landau L.D., Lifshits E.M. *Elektrodinamika sploshnykh sred* [Electrodynamics of continuous media]. M., Nauka, 1982, 620 p.
3. Yachikov I.M., Zaretskaya E.M. Kharakter magnitnogo polya vblizi grafitirovannykh elektrodov DSP [The nature of the magnetic field near the graphite electrodes electric arc furnace], *Sovremennye problemy elektrometallurgii stali* [Modern problems of electrometallurgy of steel]: materialy XIV Mezhdunarodnoy konferentsii/ pod redaktsiey V.E. Roshchina – Chelyabinsk: Izdatel'skiy tsentr YuUrGU, 2010, no 2, pp. 148-154.
4. Yachikov I.M., Zaretskaya E.M., Kharakter magnitnogo polya vblizi grafitirovannykh elektrodov DSP [The nature of the magnetic field near the graphite electrodes electric arc furnace], *Aktual'nye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya* [Actual problems of modern science, technology and education]: materialy 69-oy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Magnitogorsk: Izd-vo Magnitogorsk. gos. tekhn. un-ta im. G.I. Nosova, 2011, no.2, p 13-15.
5. Yachikov I.M., Zaretskaya E.M., Modelirovanie magnitnogo polya vblizi grafitirovannykh elektrodov DSP [Modelling of magnetic field near the graphite electrodes EAF], *Prilozhenie matematiki v ekonomicheskikh i tekhnicheskikh issledovaniyakh*. [The application of mathematics in economic and technical studies] Vyp. 3: sb. nauchnykh trudov pod red. M.V. Bushmanovoy. Magnitogorsk: Izd-vo Magnitogorsk. Gos. tekhn. un-ta im. G.I. Nosova, 2011, p. 41-46.
6. Yachikov I.M., Zaretskaya E.M., Analiz povedeniya magnitnogo polya vblizi elektrodov dugovykh pechey posredstvom matematicheskogo modelirovaniya [Analysis of the behavior of the magnetic field near the electrodes of the electric arc furnace by means of mathematical modeling], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya*, [News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy 2011, no1, pp 18-20.
7. Yachikov I.M., Kostyleva E.M., Khrumshin V.R., Raschet elektromagnitnykh sil, deystvuyushchikh na dugi v trekhfaznoy dugovoy pechi [Calculation of electromagnetic forces acting on arcs in three-phase arc furnace], *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy* [The certificate on the state registration of the program] №2016618499 ot 01 avgusta 2016.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КЛЕТИ НЕПРЕРЫВНОГО СТАНА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ В ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ОТКЛОНЕНИЯХ ВЕЛИЧИН

Е.Э. Бодров<sup>1</sup>, А.Г. Рыбаков<sup>1</sup>, С.И. Бодрова<sup>2</sup>, Е.С. Алейникова<sup>3</sup>, М.В. Фёдорова<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия

<sup>2</sup> ГАОУ СПО (ССУЗ) ЧО «Политехнический колледж», г. Магнитогорск, Россия

<sup>3</sup> ЗАО «КонсОМ СКС», г. Магнитогорск, Россия  
fortheartist@mail.ru

**Аннотация.** В работе получены зависимости характеризующие, как процесс прокатки металлической полосы в клетки непрерывного стана холодной прокатки, так и электрический привод и нажимное устройство, являющиеся регулирующими элементами, воздействующими на толщину обрабатываемой полосы. Кроме того, приведено описание взаимодействия всех клеток стана между собой. На основании полученных выражений, описывающих процесс прокатки, построена модель одной прокатной клетки, выраженная в относительных отклонениях переменных, входящих в нее. Это позволило упростить предложенную модель за счет линеаризации зависимостей в рабочем диапазоне.

**Ключевые слова:** прокатный стан, математическая модель, холодная прокатка, относительные отклонения, стальная полоса.

Сегодня к качеству листовой металлопродукции предъявляются всё более и более высокие требования. Качество стальной полосы в основном определяется продольной и поперечной разнотолщинностью. Обеспечение необходимого качества полосы может быть достигнуто улучшением технологии, например, оптимизацией контура валков или использованием возможности регулирования толщины металла в очаге деформации, используя систему управления приводами прокатной клетки. Для реализации и исследования системы управления величиной толщины металлической полосы на стане необходимо создание его модели в виде математических зависимостей.

Объектом исследования является непрерывный многоклетьевого листовой стан холодной прокатки. Для того чтобы вывести математическую модель полностью всего стана (включая разматыватель и моталки) сначала необходимо математически описать отдельно взятую клетку в её взаимосвязи с оставшимися клетками стана, что и является задачей данной работы. Тот факт, что стан, имеющий несколько последовательно расположенных рабочих клеток, осуществляющих обжатие металла, представляет собой довольно сложную систему, включающую определенное количество звеньев, обладающую взаимосвязью входящих в нее звеньев через обрабатываемую полосу, а также транспортным запаздыванием, значительно усложняет его исследование.

При синтезе математического описания отдельно взятой клетки необходимо также учитывать, что сама клетка в свою очередь также динамически сложна. Как правило, клетка такого стана имеет электрический или гидравлический нажимной механизм, обеспечивающий изменение зазора между рабочими валками во время прокатки. В связи с тем, что последние обладают определенными преимуществами перед электрическими, в работе рассмотрены нажимное устройство именно гидравлического типа (ГНУ).

Для прокатной клетки характерно наличие двух управляющих воздействий: перемещения нажимных винтов ГНУ и угловой скорости вращения валков, выполняющих процесс деформации стали. Регулируемыми переменными являются: натяжения стальной полосы после выхода из клетки (переднее натяжение), толщина стальной полосы после ее обработки в клетки, линейная скорость, с которой металл перемещается в момент входа в клетку. Именно посредством изменения вышеприведенных величин каждая клетка находится во взаимодействии с клетками, расположенными до и после нее по линии прокатки. Любая клетка испытывает влияние как контролируемых, так и непредсказуемых возмущений, таких как, колебания толщины и профиля металла входящего в область обжатия, изменение натяжения металла перед очагом деформации, изменение каких-либо механических параметров стали, величины трения в пространстве между рабочими валками и т.д.

На сегодняшний день существует множество исследований, посвященных рассматриваемым станам. Созданы модели, детально описывающие механизмы и явления, происходящие в межвалковом зазоре, а также взаимозависимость как переменных, на которые осуществляется воздействие, так и возмущений для нескольких элементов производственной линии. Основываясь на этих моделях, были разработаны основные положения, касающиеся управления толщиной выходящего из последней клетки металла и натяжения металла между прокатными клетками производственной линии [1-6].

Как было сказано выше, для получения математического описания стана, имеющего  $n$  клеток, необходимо в первую очередь получить описание, характеризующее одну прокатную клетку стана, с помощью системы алгебраических и дифференциальных уравнений, характеризующих зависимости между переменными, характеризующими процесс обработки стального

материала в очаге деформации. Наибольший интерес с точки зрения упрощения разрабатываемой модели представляют технологические параметры электропривода при небольших изменениях входящих в модель переменных. Теоретическое обоснование такой системы уравнений было получено в трудах ряда авторов [1-6].

Для того, чтобы математически описать взаимосвязь электроприводов прокатных валков стана и технологического аспекта обработки стальной полосы необходимо синтезировать зависимости, выраженные в приращениях параметров обработки стального материала, а именно: давление обрабатываемой полосы на рабочие валки, момент прокатки и скольжение. При этом нужно учесть зависимость этих параметров от изменения таких величин, как натяжение стали (до и после валков), толщина полосы на входе и выходе из клетки, предел текучести металла перед клетью, коэффициент трения в межвалковом пространстве и перемещение нажимного механизма.

С целью упрощения описания взаимозависимостей между прокатными механизмами использованы некоторые допущения [7-9]:

1. В установившемся режиме скорости перемещения всех участков металла между клетями равны. Это справедливо при условии отсутствия в данном промежутке пластической деформации. В переходных режимах это равенство может нарушаться.

2. Клетки стана абсолютно жесткие. Это означает, что обжатия в каждой клетке не зависят от переднего и заднего натяжений. Коэффициент трения в межвалковом пространстве, предел текучести металла, а также толщина подката – неизменны.

3. Упругие деформации, вызванные межклетевыми натяжениями в очаге деформации не передаются.

Для того, чтобы линеаризировать систему уравнений, описывающих прокатную клетку, и упростить реализацию разрабатываемой модели было решено заменить абсолютные значения параметров в уравнениях на приращения. После чего выполнено преобразование полученных приращений величин в их относительные отклонения. Это было сделано для того, чтобы обеспечить однородность описывающих  $i$ -ую клетку зависимостей, включающих в себя различные, как по физической сущности, так и по величине переменные. Получившиеся уравнения, выраженные таким образом, для давления  $\Delta P_i^*$ , момента  $\Delta M_i^*$  и величины характеризующей скольжение  $\Delta \lambda_i^*$ , где  $\lambda_i = 1 + S_i$ , будут иметь вид [10-12]:

$$\begin{aligned} \Delta P_i^* &= k_{1,i} \cdot \Delta h_i^* + k_{2,i} \cdot \Delta f_i^* + k_{3,i} \cdot \Delta \sigma_i^* + \\ &+ k_{4,i} \cdot \Delta F_{i-1}^* + k_{5,i} \cdot \Delta F_i^* + k_{6,i} \cdot \Delta d_i^*; \\ \Delta M_i^* &= k_{7,i} \cdot \Delta h_i^* + k_{8,i} \cdot \Delta H_i^* + k_{9,i} \cdot \Delta f_i^* + \\ &+ k_{10,i} \cdot \Delta \sigma_i^* + k_{11,i} \cdot \Delta F_{i-1}^* + k_{12,i} \cdot \Delta F_i^*; \\ \Delta \lambda_i^* &= k_{13,i} \cdot \Delta h_i^* + k_{14,i} \cdot \Delta H_i^* + k_{15,i} \cdot \Delta f_i^* + \\ &+ k_{16,i} \cdot \Delta \sigma_i^* + k_{17,i} \cdot \Delta F_{i-1}^* + k_{18,i} \cdot \Delta F_i^*, \end{aligned}$$

где  $k_j \div k_{18}$  – коэффициенты, определяемые технологией и представляющие собой частные производные, которые могут быть получены либо посредством расчета, либо графоаналитически при использовании ранее определен-

ных зависимостей давления и момента от параметров прокатки стали, полученных экспериментально,

$$\begin{aligned} c_1 &= \frac{\frac{\partial P}{\partial h}}{1 - \frac{1}{C_k} \cdot \frac{\partial P}{\partial H}}; \quad c_2 = \frac{\frac{\partial P}{\partial f}}{1 - \frac{1}{C_k} \cdot \frac{\partial P}{\partial H}}; \quad c_3 = \frac{\frac{\partial P}{\partial \sigma}}{1 - \frac{1}{C_k} \cdot \frac{\partial P}{\partial H}}; \quad c_4 = \frac{\frac{\partial P}{\partial F_0}}{1 - \frac{1}{C_k} \cdot \frac{\partial P}{\partial H}}; \\ c_5 &= \frac{\frac{\partial P}{\partial F}}{1 - \frac{1}{C_k} \cdot \frac{\partial P}{\partial H}}; \quad c_6 = \frac{\frac{\partial P}{\partial H}}{1 - \frac{1}{C_k} \cdot \frac{\partial P}{\partial H}}; \quad c_7 = \frac{\partial M}{\partial h}; \quad c_8 = \frac{\partial M}{\partial H}; \quad c_9 = \frac{\partial M}{\partial f}; \\ c_{10} &= \frac{\partial M}{\partial \sigma}; \quad c_{11} = \frac{\partial M}{\partial F_0}; \quad c_{12} = \frac{\partial M}{\partial F}; \quad c_{13} = \frac{\partial S}{\partial h}; \quad c_{14} = \frac{\partial S}{\partial H}; \quad c_{15} = \frac{\partial S}{\partial f}; \\ c_{16} &= \frac{\partial S}{\partial \sigma}; \quad c_{17} = \frac{\partial S}{\partial F_0}; \quad c_{18} = \frac{\partial S}{\partial F}; \end{aligned}$$

$\Delta P^*, \Delta M^*, \Delta \lambda_i^*, \Delta F^*, \Delta h^*, \Delta H^*, \Delta f^*, \Delta \sigma^*, \Delta d^*$  – относительные отклонения давления полосы на поверхность рабочего валка, момента, характеризующей скольжение величины, натяжения стали после выхода из зоны деформации, величин толщины, значения трения, предельной величины текучести стали до входа в зону деформации и приращения длины рабочего хода гидравлического механизма.

Приведенные ниже выражения характеризуют взаимозависимость параметров каждой клетки рассматриваемого стана от тех же параметров остальных клеток:

$$\begin{aligned} F_i &= \frac{E \cdot Q_i}{l_i} \int_0^t (V_{i+1}^t - V_i^t) dt + F_{i,нач}; \\ k_{\Pi,i} &= \frac{1}{k_{18,i} + \frac{F_{i,\delta}}{E \cdot Q_i \cdot \lambda_{i,\delta}} - k_{17,i+1}}; \quad T_{\Pi,i} = \frac{k_{\Pi,i} \cdot l_i \cdot F_{i,\delta}}{E \cdot Q_i \cdot V_{i,\delta}}; \\ \Delta F_i^* &= \frac{k_{\Pi,i}}{1 + T_{\Pi,i} p} \cdot (\Delta \omega_{i+1}^* - \Delta \omega_i^* + \\ &+ k_{18,i+1} \cdot \Delta F_{i+1}^* - k_{17,i} \cdot \Delta F_{i-1}^* + \\ &+ k_{13,i+1} \cdot \Delta h_{i+1}^* + k_{14,i+1} \cdot \Delta H_{i+1}^* + \\ &+ k_{15,i+1} \cdot \Delta f_{i+1}^* + k_{16,i+1} \cdot \Delta \sigma_{i+1}^* - \\ &- k_{13,i} \cdot \Delta h_i^* - k_{14,i} \cdot \Delta H_i^* - \\ &- k_{15,i} \cdot \Delta f_i^* - k_{16,i} \cdot \Delta \sigma_i^*), \end{aligned}$$

где  $E$  – величина, характеризующая упругость стали;  $Q_i$  – профиль обрабатываемого металла между прокатными валками;  $l_i$  – дистанция между осями валков соседних прокатных клеток;  $V_{i+1}^t$  – линейная величина скорости входа стали в следующую по технологической линии,  $(i+1)$ -ую, клетку;  $V_i$  – скорость выхода полосы из  $i$ -ой клетки;  $F_{i,нач}$  – значение натяжения стали между прокатными клетями, создаваемое до начала процесса обработки стали;  $F_{i,\delta}, \lambda_{i,\delta}, V_{i,\delta}$  – базовые величины,  $k_{\Pi,i}, T_{\Pi,i}$  – параметры прокатываемой полосы.

Электропривод может быть описан следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} \Delta \omega_i^* &= \frac{1}{T_{M,i} p} (\Delta M_{д,i}^* - \Delta M_{с,i}^*); \quad \Delta M_{с,i}^* = \Delta M_i^*; \quad \Delta M_{д,i}^* = \Delta \Phi_i^* + \Delta I_i^*; \\ \Delta I_i^* &= \frac{1}{1 + T_{Я,i} p} (\Delta E_{д,i}^* - \Delta E_{дв,i}^*); \quad \Delta E_{дв,i}^* = \Delta \Phi_i^* + \Delta \omega_i^*; \\ \Delta \Phi_i^* &= \frac{k_{\Phi}}{1 + T_{К,i} p} \Delta I_{6,i}^*; \quad \Delta U_{6,i}^* = \frac{k_{тв,i}}{1 + T_{тв,i} p} \Delta u_{ув,i}^*; \end{aligned}$$

$$\Delta E_{d,i}^* = \frac{k_{\text{ТП},i}}{1+T_{\text{ТП},i}p} \Delta U_{\text{пр},i}^* ; \Delta U_{\text{в},i}^* = \frac{k_{\text{ТВ},i}}{1+T_{\text{ТВ},i}p} \Delta u_{\text{в},i}^* ;$$

$$\Delta I_{\text{в},i}^* = \frac{1+T_{\text{К},i}p}{(1+T_{\text{БК},i}p)} \Delta U_{\text{в},i}^* ,$$

где  $\Delta \omega^*, \Delta M_{\text{Д}}^*, \Delta M_{\text{С}}^*, \Delta I^*, \Delta E_{\text{д}}^*, \Delta E_{\text{ДВ}}^*, \Delta U_{\text{пр}}^*$  – относительные приращения частоты вращения электродвигателя, момента на валу двигателя, статического момента, тока якоря двигателя, выходной ЭДС тиристорного преобразователя (ТП), противо-ЭДС двигателя, величины управляющего сигнала, подаваемого на ТП;  $\Delta I_{\text{в}}^*, \Delta U_{\text{в}}^*, \Delta u_{\text{в}}^*, \Delta \Phi^*$  – относительные приращения тока, протекающего по цепи возбуждения приводного двигателя, напряжения питания обмотки возбуждения двигателя, управляющего сигнала на тиристорном возбудителе (ТВ) и магнитного потока;  $k_{\text{ТВ}}, T_{\text{ТВ}}, k_{\Phi}$  – усиление ТВ, постоянная времени ТВ, коэффициент, характеризующий пропорциональность между магнитным потоком двигателя и током протекающим по его обмотке возбуждения;  $T_{\text{К}}, T_{\text{БК}}$  – временные постоянные, характеризующие цепь возбуждения;  $T_{\text{М}}, T_{\text{Я}}, k_{\text{ТП}}, T_{\text{М}}$  – приведенная механическая и электромагнитная постоянные, усиление ТП, постоянная времени ТП.

Для ГНУ характерны зависимости:

$$\Delta Q_i^* = \frac{k_{\text{СК},i}}{T_{\text{СК},i}p+1} \Delta u_{\text{СК},i}^* ; \Delta u_{\text{СК},i}^* = \frac{\Delta u_{\text{СК},i}}{u_{\text{СК},i}} ; \Delta Q_i^* = \frac{\Delta Q_i}{Q_{\delta,i}} ;$$

$$k_{\text{СК},i} = \frac{dQ_i}{du_{\text{СК},i}} \frac{u_{\text{СК},i}}{Q_{\delta,i}} ; \Delta P_{\Gamma,i}^* = \frac{\Delta P_{\Gamma,i}}{P_{\Gamma,i}} ;$$

$$\frac{S_{\Gamma,i} P_{\Gamma,i}}{P_{\delta,i}} \Delta P_{\Gamma,i}^* - \Delta P_i^* = \frac{b_i \cdot H_{\delta,i}}{P_{\delta,i}} \left( \frac{m_i}{b_i} p + 1 \right) p \cdot \Delta d_i^* ;$$

$$\frac{r_i \cdot P_{\Gamma,i}}{Q_{\delta,i}} \left( \frac{V_{\text{в},i}}{E_i} p + 1 \right) \cdot \Delta P_{\Gamma,i}^* =$$

$$= \Delta Q_i^* - \frac{S_{\Gamma,i} H_{\delta,i}}{Q_{\delta,i}} p \cdot \Delta d_i^* ,$$

где  $\Delta Q^*, \Delta u_{\text{СК}}^*$  – относительные приращения расхода используемой в механизме жидкости и сигнала задания на сервоклапан;  $k_{\text{СК}}, T_{\text{СК}}$  – параметры сервоклапана;  $k_{\text{ГНУ}1}, k_{\text{ГНУ}2}, k_{20}, T_{\text{ГНУ}1}, T_{\text{ГНУ}2}, G_1, G_2, G_3, G_4$  – параметры ГНУ.

На рис. 1 приведена структурная схема  $i$ -ой клетки, синтезированная при помощи описанных выражений.

В работе получены выражения для величины усиления от обрабатываемой полосы на валки, момента прокатки, опережения стали в деформационной зоне, натяжения. Были получены зависимости для приводной части клетки, а именно электропривода и нажимного механизма. Кроме того, описана взаимозависимость отдельно взятой клетки с оставшимися клетями через обрабатываемую металлическую полосу, представленной в виде элемента, имеющего передаточную функцию инерционного звена.

На основании полученных выражений, описывающих процесс обработки металлической полосы в зоне деформации и систему управления величиной толщины полосы, включающую электропривод рабочих валков и нажимной механизм, разработана модель  $i$ -ой прокатной клетки стана, выраженная в относительных приращениях. Это позволяет упростить полученную математическую модель за счет обеспечения её линеаризации в пределах рабочего диапазона.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дружинин Н.Н. Непрерывные станы как объект автоматизации. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1975. – 336 с.: ил.
2. Бройдо Б.С. Синтез систем автоматического управления непрерывными станами холодной прокатки. – М.: Металлургия, 1978. – 159 с.: ил.
3. Филатов А.С. Электропривод и автоматизация реверсивных станов холодной прокатки. – М.: Металлургия, 1973. – 375 с.: ил.

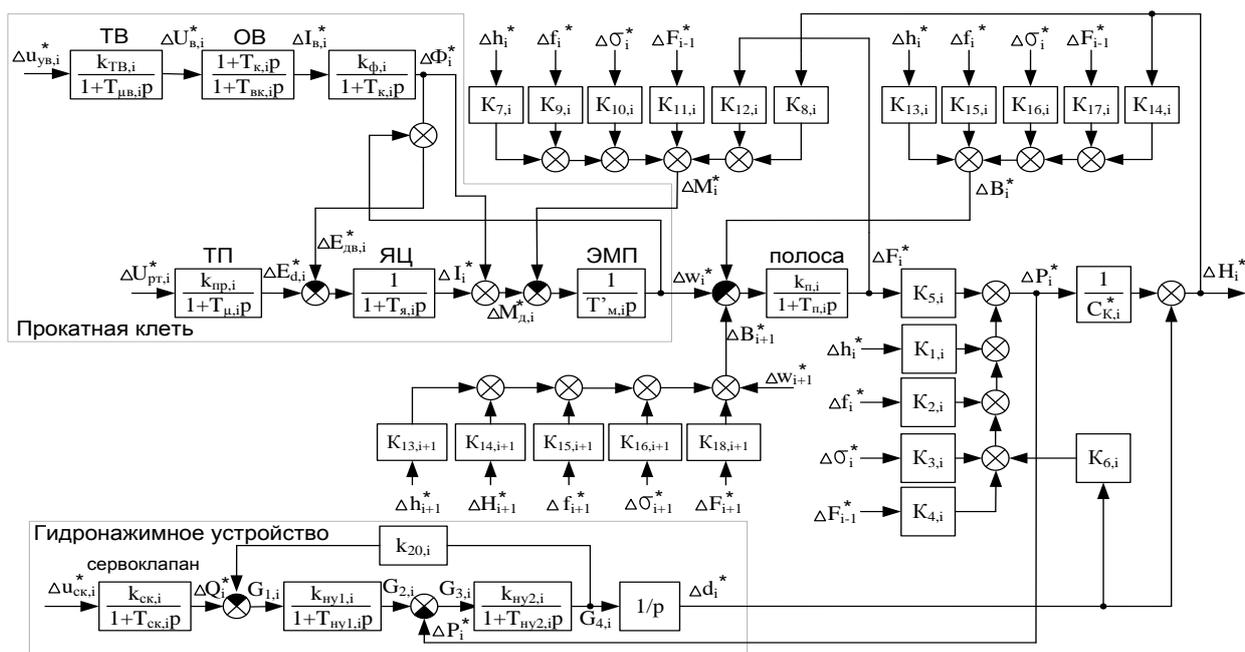


Рис. 1. Структурная схема электромеханической системы как объекта управления  $i$ -ой клетки непрерывного стана: ОВ – обмотка возбуждения; ЯЦ – якорная цепь; ЭМП – электромеханический преобразователь

4. Выдрин В.Н., Федосиенко А.С., Крайнов В.И. Процесс непрерывной прокатки. – М.: Metallurgy, 1970. – 456 с.: ил.
5. J. Pittner and M.A. Simaan, Tandem cold metal rolling mill control, *Advances in industrial control*, ISBN 978-0-85729-067-0, Springer-Verlag London Ltd., 2011.
6. Documents of 13th International rolling technology course, Bariloche, Argentina, 18-23rd April, 1999 // *Industrial Automation Services Pty Ltd*, 1999. pp. 1-12.
7. Файнберг Ю.М. Автоматизация непрерывных станов горячей прокатки. – М.: Metallurgizdat, 1963. – 326 с.: ил.
8. Морозов Д.П. К теории электромеханических процессов станов холодной прокатки // *Вестник электропромышленности*. – 1944. – №3. – С. 16-19.
9. Ключев В.И. Теория электропривода: учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.: ил.
10. Автоматизированный электропривод непрерывных прокатных станов с многовалковыми калибрами: монография / И.А. Селиванов, О.И. Петухова, Е.Э. Бодров, И.В. Суздалев – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2008. – 250 с.: ил.
11. Бодров Е.Э. Модернизация многосвязной системы электропривода непрерывного листового стана холодной прокатки: дис. ... канд. техн. наук. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2010. – 146 с.
12. Селиванов И.А., Бодров Е.Э. Матричная модель непрерывного листового стана холодной прокатки // *Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. тр.* – Вып. 14. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2007. № 14. – С. 86-96.

## MATHEMATICAL MODEL FOR ROLLING STAND OF THE CONTINUOUS COLD ROLLING MILL EXPRESSED IN RELATIVE DEVIATIONS

**E.E. Bodrov<sup>1</sup>, A.G. Ribakov<sup>1</sup>, S.I. Bodrova<sup>2</sup>, E.S. Aleynikova<sup>3</sup>, M.V. Fedorova<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

<sup>2</sup> State institution "Polytechnical college", Magnitogorsk, Russia

<sup>3</sup> CJSC «KonsOM SKS», Magnitogorsk, Russia

**Abstract.** In the paper there were obtained mathematical equations characterizing basic drawing parameters in deformation zone such as metal pressure on rollers, drawing momentum, metal lead in deformation zone, band tension between stands. Also there were obtained equations for power part of electric drive, hydraulic thrust device and described interconnection of all the mill's stands through the drawing band. Based on obtained equations describing drawing process there was developed mathematical model for one stand of the continuous rolling mill that was expressed in relative deviations of its parameters which allowed to simplify the model through its linearization in a working range.

**Keywords:** rolling mill, mathematical model, cold rolling, relative deviations, steel band

### REFERENCES

1. Druzhinin N.N. *Nepreryvnye stany kak ob'ekt avtomatizatsii* [Continuous mills as an automation object], 2nd edition, revised and ext., Moscow, Metallurgy, 1975, 336 p.
2. Broydo B.S. *Sintez sistem avtomaticheskogo upravleniya nepreryvnymi stanami kholodnoy prokatki* [Synthesis of automatic control systems for continuous cold rolling mills], Moscow, Metallurgy, 1978, 159 p.
3. Filatov A.S. *Elektroprivod i avtomatizatsiya reversivnykh stanov kholodnoy prokatki* [Electric drive and automation of the reversing cold rolling mills], Moscow, Metallurgy, 1973, 375 p.
4. Vydrin V.N., Fedosienko A.S., Kraynov V.I. *Protsess nepreryvnoy prokatki* [The process of continuous rolling], Moscow, Metallurgy, 1970, 456 p.
5. J. Pittner and M.A. Simaan, Tandem cold metal rolling mill control, *Advances in industrial control*, ISBN 978-0-85729-067-0, Springer-Verlag London Ltd., 2011.
6. Documents of 13<sup>th</sup> International rolling technology course, Bariloche, Argentina, 18-23<sup>rd</sup> April, 1999 // *Industrial Automation Services Pty Ltd*, 1999. pp. 1-12.
7. Faynberg Yu.M. *Avtomatizatsiya nepreryvnykh stanov goryachey prokatki* [Automation of continuous hot rolling mills], Moscow, Metallurgizdat, 1963, 326 p.
8. Morozov D.P. On the theory of electromechanical processes of cold rolling mills [K teorii elektromekhanicheskikh protsessov stanov kholodnoy prokatki], *Vestnik elektropromyshlennosti* [Bulletin of the Electrical Industry], 1944, no.3. pp. 16-19.
9. Klyuchev V.I. *Teoriya elektroprivoda* [Theory of electric drive], Moscow, Energoatomisdat, 1985, 560 p.
10. Selivanov I.A., Petukhova O.I., Bodrov E.E., Suzdalev I.V. *Avtomatizirovannyy elektroprivod nepreryvnykh prokatnykh stanov s mnogovalkovymi kalibrami* [The automated electric drive of continuous rolling mills with a centuries-old calibers], Magnitogorsk, NMSTU, 2008, 250 p.
11. Bodrov E.E. *Modernizatsiya mnogosvyaznoy sistemy elektroprivoda nepreryvnogo listovogo stana kholodnoy prokatki* [Modernization of a multiply connected electric drive system on a continuous strip cold rolling mill], Magnitogorsk, NMSTU, 2010, 146 p.
12. Selivanov I.A., Bodrov E.E. Matrix model of continuous sheet cold rolling mill [Matrichnaya model' nepreryvnogo listovogo stana kholodnoy prokatki], *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrical systems and complexes], Magnitogorsk, NMSTU, 2007, no.14, pp. 86-96.

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУР ЛИКВИДУС И СОЛИДУС МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РАСПЛАВОВ НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ НАПРАВЛЕННОЙ ХИМИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

Д.Н. Тогобицкая<sup>1</sup>, И.Р. Снигура<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины  
г. Днепр, Украина

<sup>2</sup> snigurairina@mail.ru

**Аннотация.** С позиции концепции направленной химической связи рассмотрена возможность прогнозирования температур ликвидус и солидус железоуглеродистых сплавов различного назначения. На основе анализа информации о температуре ликвидус и солидус стали предложены модели для их прогнозирования с высокой точностью.

**Ключевые слова:** параметры межатомного взаимодействия, температура ликвидус, температура солидус, кластер, микронеоднородность, качество стали.

### Введение

Современное состояние металлургического рынка по производству сталей и сплавов различного назначения вызывает ужесточение выдвигаемых требований по качеству исходного сырья и направленного формирования конечного продукта, его эксплуатационным характеристикам, использованию энергетических ресурсов.

Качество сплава можно определить как совокупность физических, химических и технологических свойств достаточных для выполнения своих функциональных назначений в готовом изделии. Задачи по разработке путей повышения качества металлопродукции из стали являются важнейшим направлением для исследователей, при этом требуется сочетание глубокого анализа всего цикла процессов с привлечением теоретических положений фундаментальной науки. В производственной практике повышение однородности расплава на конечных стадиях процесса играет особо значимую роль при выплавке качественных металлов и сплавов, путем интенсификации перемешивания, дегазации расплава, корректировками температурных режимов. В то же время все чаще делаются акценты на необходимости учета представлений о строении и структурных превращениях в жидких металлах, которые в свою очередь дают возможность повлиять на структуру расплава на начальных этапах его выплавки.

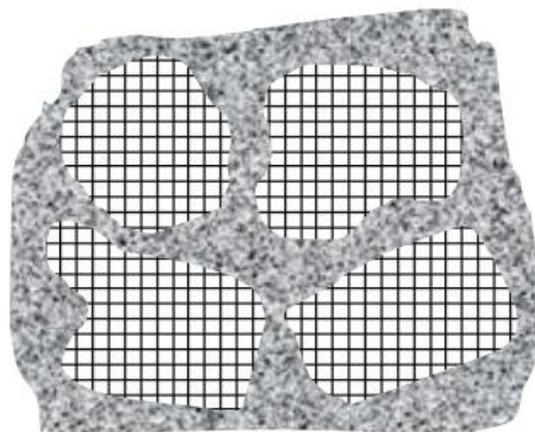
Однако до сих пор нет сформулированных фундаментальных положений жидкого состояния металлических систем, которые послужили бы основой для формирования общепринятой модели.

На сегодняшний день существует более десяти моделей строения жидкого состояния металлических систем, которые можно разделить на две группы: квазигазовые (теория реального газа Ван-дер-Ваальса, модель жестких сфер, модель Дж. Бернала и др.) и квазикристаллические (сиботаксическая, квазиполикристаллическая, квазихимическая, кластерная модели и другие).

За последние несколько лет возросло количество публикаций основанных на рассмотрении многокомпонентных растворов или расплавов на основе кластерной

модели жидкого состояния. Фундамент кластерной модели был заложен исследованиями Френкеля Я.И, а позднее Стюартом продолжен и дополнен данными рентгенографического анализа. Изучение кластерных микрообластей продолжается и сейчас и отображено в работах Скребцова А.М., Новохатского И.А., Найдека В.Л., Ладьянова В.И, Большакова В.И. и др. Согласно этой модели расплав состоит из чередующихся в пространстве кластеров (структурно упорядоченные микрообласти, которые по своему строению напоминают кристалл) и разупорядоченной зоны (атомы находятся в хаотичном движении идентичному газовому).

Один из способов визуализации представлений кластерной модели представлено авторами работы [1] на рис. 1.

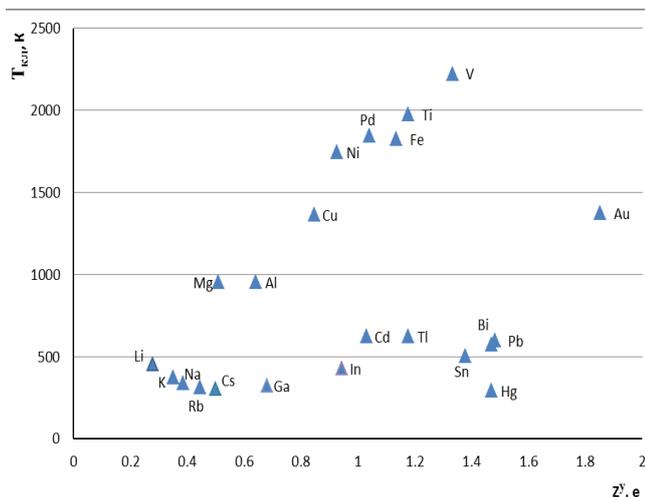


**Рис. 1. Фрагмент модельной жидкости, содержащий кластеры с упорядоченным расположением атомов и разупорядоченную зону между ними**

Так как обе области не имеют четко выраженных границ, то находятся в непрерывном взаимодействии сопровождающимся обменом атомами и перераспределением энергии системы при каждом столкновении областей. Как показано в работе [1] кластеры обладают малым временем жизни  $10^{-7} - 10^{-8}$  сек, но являются весьма устойчивыми группировками атомов и существуют в области надликвидусных температур, что

свидетельствует о микронеоднородности расплава. Гомогенность расплава, достигается при полном разупорядочении кластеров, при этом сплав теряет свойства наследственности шихты, что значительно улучшает служебные свойства готовой металлопродукции. Кластерные микрообласти влияют не только на однородность расплава, они могут выступать и в роли центров зарождения и роста неметаллических включений, ухудшая тем самым качество сплава. Область существования кластерных группировок выше температуры ликвидус, но ниже температуры кипения. По данным работы [1] температура полного разупорядочения кластеров составляет  $(1,4-2,1) T_{пл}$ .

Кластерные группировки состоят от нескольких единиц до нескольких сотен или тысяч атомов, которые удерживаются вместе различной силой связей и энергией, по этому микронеоднородность жидких сплавов описывается не только наличием кластеров, но и их различным составом, строением, устойчивостью. Самые устойчивые кластеры образуются с наиболее сильной межатомной связью между компонентами расплава как показано на рис. 2 для однокомпонентных расплавов металлов [2].



**Рис. 2. Зависимость температуры существования кластера однокомпонентных металлических расплавов от параметра зарядового состояния системы  $Z^y$**

Наиболее устойчивыми (рис. 2) являются кластеры тугоплавких однокомпонентных металлических расплавов, что связано с их химической индивидуальностью, малыми значениями среднестатистического межъядерного расстояния и высокими значениями зарядового состояния системы в расплаве. Также важность учета влияния межатомных связей ранее была отмечена в исследованиях Б. А. Баума по образованию кластеров в бинарных железуглеродистых сплавах [3].

Реальные сплавы являются сложными системами, и их микронеоднородность имеет более сложный характер, чем у бинарных сплавов, поскольку одновременно могут сосуществовать несколько разных кластерных микрообластей. Если предположить, что чем выше температура ликвидус металла, тем соответственно более прочные его кластеры в жидком состоянии, тогда температура ликвидус сплава может выступать в роли лимитирующего звена процесса разрушения кластера.

Разработка методов с высокой точностью прогнозирования температуры ликвидус позволит сформировать желаемую однородную структуру сплава.

Важность температуры ликвидус заключается не только в обозначении и определении границ области существования кластеров. Температурный режим плавки и разливки сталей и сплавов влияет на эффективность протекания реакций между металлом и шлаком, степень усвоения легирующих или модифицирующих добавок, образование неметаллических включений и газов, механические и физико-химические свойства металла.

Знание и оперативные методы определения температуры ликвидус, учитывающие химический состав стали и межатомное взаимодействие между компонентами расплава, дают возможность избежать перегрева металла, повысить его качество и дать рекомендации по оптимальному температурному режиму плавки.

В тоже время, как отмечает автор [4] использование универсального или общепринятого метода расчета температуры ликвидус на практике вызывает затруднение, а рекомендации специалистов довольно противоречивы.

Широкое применение среди многих исследователей [4 – 7] имеет эмпирическая зависимость для определения температуры ликвидус сталей, в некоторых случаях применимая и для ферросплавов, следующего вида:

$$T_L = T_{плав Fe} - (\sum(a_0 + a_1^i [i] + a_2^i [i]^2)) \quad (1)$$

где  $T_{плав Fe}$  – температура плавления чистого железа (в соответствии с большей частью публикаций  $T_{плав Fe} = 1539^\circ C$ );  $a_0$  – коэффициент приведения температуры плавления чистого железа (вводится в случае принятия значения температуры плавления железа отличительного от приведенного выше);  $a_1^i [i], a_2^i [i]^2$  – коэффициенты значимости 1-го и 2-го порядка для соответствующего элемента  $i$ , содержащегося в стали данной марки;  $[i]$  – содержание элемента  $i$  в стали данной марки, %.

В большинстве случаев применение формулы (1) показывает хорошую сопоставимость с экспериментальными значениями. Однако данная формула для расчета температуры ликвидус базируется на рассмотрении двойных диаграмм состояния типа  $Fe - Xi$  основываясь на гипотезе, что каждый химический элемент влияет на снижение температуры ликвидус железа независимо друг от друга, при этом не учитывается взаимодействие между компонентами расплава вида  $Xi_j - Xi_2$ , например:  $C-Mn$ .

### Основные проблемы и решения

В настоящей работе рассматривается возможность прогнозирования температуры ликвидус и солидус железуглеродистых сталей и сплавов с использованием представлений концепции направленной химической связи, разработанной Приходько Э.В. [8].

Принцип концепции базируется на вводе в связь между составом и свойствами расплавов промежуточного звена в виде комплекса интегральных модельных параметров межатомного взаимодействия, которые характеризуют химическое и структурное состояние исследуемого материала. Эффективность такого подхода нами была подтверждена при разработке моделей для прогнозирования температур ликвидус и солидус

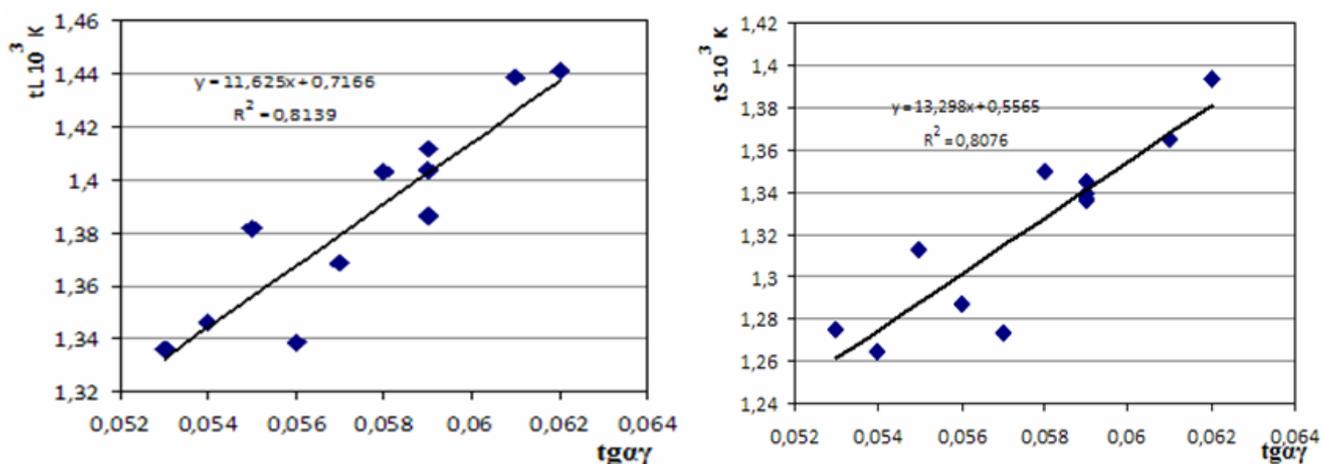


Рис. 3. Зависимость температур ликвидус и солидус жаропрочных никелевых сплавов от параметра межатомного взаимодействия  $tg\alpha_\gamma$

Таблица 1

Химический состав и данные температур ликвидус ( $T_L$ ) и солидус ( $T_S$ ) исследуемых сталей

Марка стали	Содержание элементов, %							$T_L, ^\circ\text{C}$		$T_S, ^\circ\text{C}$	
	C	Mn	Si	Cr	Ni	S	P	По данным работы [10]	По диагр. Fe-C [10]	По данным работы [10]	По диагр. Fe-C [10]
09Г2С	0,10	1,45	0,77	0,16	0,10	0,030	0,028	1512	1527	1478	1494
Ст 3	0,19	0,45	0,20	0,08	0,12	0,030	0,021	1508	1518	1465	1482
18ХГТ	0,19	0,93	0,29	1,20	0,06	0,026	0,017	1502	1518	1457	1482
35	0,38	0,65	0,24	0,14	0,07	0,028	0,014	1490	1506	1420	1438
40Х	0,42	0,63	0,25	0,95	0,09	0,025	0,015	1486	1504	1409	1429
40P <sup>*1</sup>	0,43	0,58	0,32	0,07	0,10	0,031	0,027	1488	1503	1412	1429
45	0,47	0,69	0,31	0,08	0,06	0,021	0,017	1485	1500	1403	1421
50Г	0,54	0,92	0,26	0,09	0,12	0,025	0,017	1479	1498	1388	1410
30ХГСА	0,31	1,00	1,10	0,95	0,11	0,018	0,014	1487	1512	1416	1460
60С2	0,59	0,84	1,92	0,17	0,08	0,023	0,015	1451	1492	1342	1390
58ПП	0,59	0,16	0,23	0,08	0,10	0,020	0,014	1480	1492	1375	1388
Рельсовая <sup>*2</sup>	0,74	0,83	0,18	0,05	0,07	0,029	0,018	1468	1480	1334	1348
Р – 18 <sup>*3</sup>	0,77	0,31	0,19	4,20	0,15	0,019	0,012	1454	1478	1301	1340

\*1 0,003% В. \*2 0,13% As. \*3 18,10% W; 1,32% V; 0,39% Mo

жаропрочных никелевых сплавов, которые имеют следующий вид:  $T_L, T_S = f(\rho_{\text{общ}}, tg\alpha_\gamma)$ ,  $R^2 \geq 0.9$  [9]. Особенностью моделей, является учет лимитирующего воздействия на  $T_L$  и  $T_S$  средневзвешенного параметра констант легирующей подсистемы  $\gamma$ -упрочнителей твердого раствора (Mo, W, Re, Ta) –  $tg\alpha_\gamma$ , который характеризует изменение радиуса иона при изменении его заряда (рис. 3).

Объектом исследования в данной работе выступают железоуглеродистые стали и сплавы, экспериментально изученные в работе [10] с широкой областью применения, химический состав, температуры ликвидус и солидус, которых приведены в табл. 1.

Значения параметров межатомного взаимодействия согласно концепции направленной химической связи не постулируются, а вычисляются как переменные, зависящие от состава расплава. На основе сведений о химическом составе для многокомпонентных расплавов (табл. 1), рассчитаны параметры межатомного взаимодействия. ( $Z^y$  – параметр зарядового состояния системы, e;  $d$  – среднестатистическое межъядерное расстояние,  $10^{-1}$  нм;  $tg\alpha$  – константа для каждого сплава, характеризую-

щая изменение радиуса иона при изменении его заряда;  $\rho_l$  – направленная зарядовая плотность, e/нм) (табл.2).

Таблица 2

Параметры межатомного взаимодействия исследуемых сталей, согласно данным табл. 1

Марка стали	$Z^y, e$	$d, 10^{-1}$ нм	$tg\alpha, e/\text{нм}$	$\rho_l, e/\text{нм}$
09Г2С	1,219	2,789	0,088	3,534
Ст 3	1,176	2,788	0,0882	3,529
18ХГТ	1,225	2,787	0,0879	3,546
35	1,197	2,757	0,0884	3,563
40Х	1,225	2,752	0,0883	3,578
40P	1,201	2,747	0,0886	3,573
45	1,205	2,742	0,0886	3,579
50Г	1,215	2,734	0,0887	3,587
30ХГСА	1,259	2,748	0,0882	3,587
60С2	1,281	2,689	0,0888	3,643
58ПП	1,199	2,724	0,0888	3,596
Рельсовая	1,223	2,706	0,0889	3,615
Р – 18	1,607	2,747	0,0857	3,771

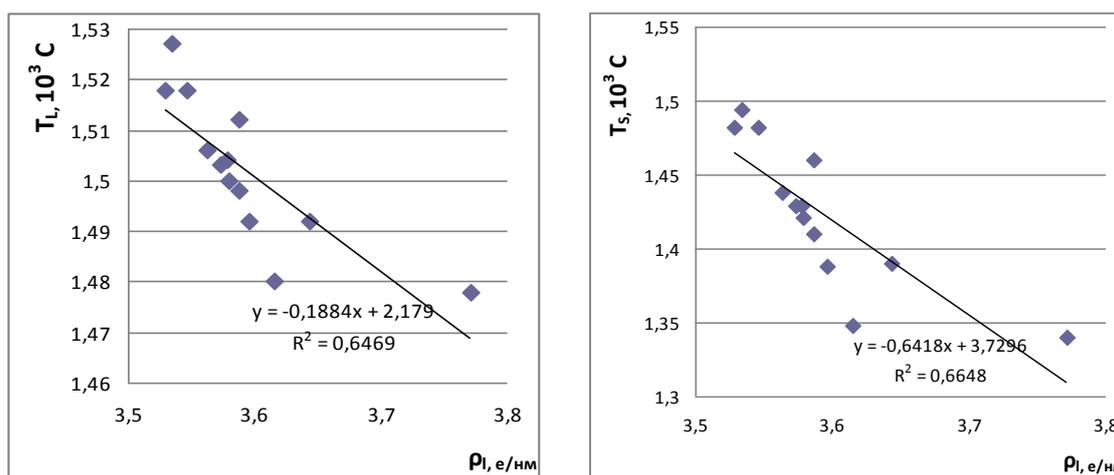


Рис. 4. Зависимость  $T_L$  и  $T_S$  от параметра направленной зарядовой плотности расплава ( $\rho_l$ )

Анализ взаимосвязей параметров межатомного взаимодействия с температурами ликвидус и солидус исследуемых сталей позволил установить, что наиболее информативным является параметр направленной зарядовой плотности ( $\rho_l$ , е/нм), который выступает в качестве информационного связующего звена с представлениями о форме электронного облака и плотности распределения электронов, локализуемых в направлении кратчайшего расстояния между реагентами (рис. 4).

Поскольку расплав - это химически единая система, целесообразным является сочетание параметров  $Z^y$  и  $\rho_l$  в комплексном виде. Интегральный параметр  $Z^y$  повышает точность прогнозной модели, как химический эквивалент системы, суммирующий данные о зарядах компонентов с учетом вероятностей образования связей разного типа. Таким образом, модель для прогнозирования температуры ликвидус и солидус с коэффициентами детерминированности  $R^2 = 0,935$  и  $R^2 = 0,930$  представляется следующим образом:  $T_L = 10^3 \times (2,994 + 0,176Z^y - 0,476\rho_l)$  и  $T_S = 10^3 \times (6,359 + 0,566Z^y - 1,571\rho_l)$  соответственно.

Сопоставительный анализ полученных результатов по предлагаемой нами модели с данными авторов [10] по определению температур ликвидус и солидус для исследуемых сталей показал, что экспериментальные и расчетные значения хорошо согласуются между собой для обоих вариантов и отличаются высокой точностью. По данным авторов [10] ошибка определения температур ликвидус и солидус составляет  $T_L = 1,22\%$ ,  $T_S = 1,68\%$ , по предлагаемой модели  $T_L = 0,22\%$ ,  $T_S = 0,53\%$ , что позволяет полагать, что предложенные физико-химические критерии  $Z^y$ ,  $\rho_l$  успешно выполняют функцию прогнозирования.

Сочетание параметров  $Z^y$  и  $\rho_l$  следует рассматривать в качестве более полного описания структурных превращений, поскольку учитываются параметры межатомного взаимодействия элементов, о важности которых также было отмечено авторами работы [4], как один из путей усовершенствования формулы (1) в которой параметры межатомного взаимодействия не учтены.

Разработанные нами модели для прогнозирования температур ликвидус и солидус железуглеродистых

сплавов были дополнительно проэкзаменованы на независимых данных, которые не вошли в исходную выборку. Как следует из сопоставительного анализа, данных исследований авторов работы [6] и расчетных значений температур ликвидус и солидус для шарикоподшипниковой стали марки ШХ15СГ, характеризуются удовлетворительной согласованностью, ошибка прогноза не превышает для  $T_L = 1,65\%$ ,  $T_S = 0,85\%$ .

Представленные регрессионные модели рекомендуются для железуглеродистых сталей и сплавов широкого спектра назначения, с доминирующим содержанием железа в матрице расплава (до 97%) и легирующей составляющей (до 20%), при этом следует учитывать, что элемент доминант лимитирует диапазон температур ликвидус и солидус сплава.

Дальнейшее пополнение базы экспериментальных данных о свойствах металлических расплавов «Банка данных «Металлургия» [12] позволит усовершенствовать прогнозные модели и оптимизировать температурные условия технологических процессов для получения качественной металлопродукции из стали с улучшенными структурными характеристиками.

## Заключение

Поскольку температурный режим определяет ход процесса от начала плавки и до разлива металла, а значительный перегрев металла (для разрушения кластерных микрообластей), является экономически неоправданным, актуализируются вопросы о температуре ликвидус и солидус расплавов. Известные способы расчета температуры ликвидус сплавов требуют дальнейшего усовершенствования и учета всех участвующих компонентов расплава. В работе предложены модели для расчета температур ликвидус и солидус железуглеродистых сталей различного назначения с учетом особенностей их химического состава на основе концепции направленной химической связи с высокой точностью прогноза.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Строение металлических жидкостей: Учебное пособие. Л.А. Жукова. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2002. 46 с.
2. Тогобицкая Д.Н., Головки Л.А., Снигура И.Р. Исследование микронеоднородности однокомпонентных металлических расплавов в области надликвидусных температур на основе параметров межатомного взаимодействия. – VII Международная научно-практическая конференция «Наука в современном мире». – г. Киев, 19 марта 2016 г. – С. 37 – 44
3. Жидкая сталь. Баум Б.А., Хасин Г.А., Тягунов Г.В. и др. - М., Металлургия, 1984. - 208 с.
4. Смирнов А. Н. Расчет температуры ликвидус стали / А. Н. Смирнов, Л. Неделькович, М. Джурджевич, Т. В. Чернобаева, З. Оданович // Сталь. 1996. № 3. С. 15 – 19.
5. Макуров С. Л. Экспериментальное и расчетное определение температуры ликвидус сложнелегированных сталей / С. Л. Макуров // Вестник Приазов. гос. тех. ун-та: Сб. научн. Тр. – Мариуполь, 2003. – Вып. № 13. – С. 46 – 49.
6. Кабишов С. М. Определение границ двухфазной зоны углеродистых и легированных сталей / С. М. Кабишов, И. А. Трусова, П. Э. Ратников, С. В. Корнеев // Литье и металлургия. 2015. № 2(79). С. 82 – 88.
7. Howe A. A. Estimation of liquidus temperatures for steels / A.A. Howe // Ironmaking and Steelmaking/ - 1988. – V. 15. - № 3. – P. 134 – 142.
8. Приходько Э.В. Эффективность комплексного легирования сталей и сплавов. – К.: Наукова думка, 1995. – 292с.
9. Тогобицкая Д. Н., Снигура И. Р. Исследование температур ликвидус и солидус жаропрочных никелевых сплавов на основе параметров межатомного взаимодействия – Материалы Международной научно-практической конференции «ЛИТЬЕ. Металлургия. 2016» – г. Запорожье, 24-26 мая, 2016 год – С. 427- 428.
10. Казачков Е. А. Изменение энтальпии некоторых сталей при высоких температурах / Е. А. Казачков, С. Л. Макуров // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1978. - № 1. – С. 67 – 69.
11. Тогобицкая Д.Н. Методологические основы и технология создания базы знаний о свойствах металлургических расплавов /Д.Н.Тогобицкая, А.Ф.Хамхотько, Э.В.Приходько //Тезисы 4-го Российского семинара «Компьютерное моделирование расплавов и стекол». – Курган. –1998. –С.41-42.

## FORECASTING OF LIQUIDUS AND SOLIDUS TEMPERATURES OF METAL MELTS ON THE BASIS OF THE CONCEPT OF DIRECTED CHEMICAL BOND

**D.N.Togobitskaia<sup>1</sup>, I.R. Snihura<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>Z.I. Nekrasov Iron and Steel Institute, Dnepr, Ukraine

**Abstract.** It is shown the possibility of predicting the liquidus and the solidus temperature of iron-carbon alloys for various purposes with the position of the concept of directed chemical bond. On the basis of the analysis of information about the liquidus and solidus temperature of steel are proposed models for their prediction with high accuracy of the forecast.

**Keywords:** parameters of interatomic interaction, liquidus temperature, solidus temperature, cluster, microinhomogeneity, quality of steel.

### REFERENCES

1. Zhukova L.A. *Stroenie metallicheskih zhidkostey: Uchebnoe posobie*. [The structure of liquid metal: Text-book], Ekaterinburg, 2002, 46 p.
2. Togobitskaia D.N., Golovko L.A., Snihura I.R. Research of microinhomogeneity one-component metallic melts in the area over the liquidus temperature on the basis of the interatomic interaction parameters [*Issledovanie mikro-neodnorodnosti odnokomponentnykh metallicheskih rasplavov v oblasti nadlikvidusnykh temperatur na os-nove parametrov mezhatomnogo vzaimodeystviya*]. – VII *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Nauka v sovremennom mire»* [VII International scientific-practical conference "Science in the modern world."]. – Kiev, March 19, 2016 - pp 37 – 44.
3. Baum B.A., Hasin G.A., Tjagunov G.V., and etc. *Zhidkaya stal'* [Liquid steel], Moscow, 1984, 208 p.
4. Smirnov A. N., Nedel'kovich L., Dzhurdzhevich M., Chernobaeva T. V., Odanovich Z. The calculation of the liquidus temperature of steel [Расчет температуры ликвидус стали], *Stal' [Steel]*, 1996, no 3, pp 15 – 19.
5. Makurov S.L. Experimental and numerical determination of the liquidus temperature of complex alloyed steels [*Ekspperimental'noe i raschetnoe opredelenie temperatury likvidus slozhnolegированных сталей*], *Vestnik Priazov. gos. tekhn. un-ta: Sb. nauchn. Tr. [Bulletin of Azov State Technical Univ: Collection of scientific Works]*, Mariupol, 2003, no. 13, pp 46 – 49.
6. Kabishov S.M., Trusova I.A., Ratnikov P.E., Korneev S.V. Defining the boundaries of the two-phase zone of carbon and alloy steels [Определение границ двухфазной зоны углеродистых и легированных сталей], *Lit'ye i metallurgiya [Casting and Metallurgy]*, 2015, no. 2(79), pp 82 – 88.
7. Howe A. A. Estimation of liquidus temperatures for steels / A.A. Howe // Ironmaking and Steelmaking/ - 1988. – V. 15. - № 3. – P. 134 – 142.

- 
8. Prikhodko E.V. *Effektivnost' kompleksnogo legirovaniya staley i splavov* [The effectiveness of complex alloying steels and alloys], Kiev, 1995, 292 p.
  9. Togobitskaia D.N., Snihura I.R. Researches of liquidus and solidus temperatures of heat-resistant nickel alloys based on the interatomic interaction parameters [Issledovanie temperatur likvidus i solidus zharoprochnykh nikelovykh splavov na osnove parametrov mezhatomnogo vzaimodeystviya], *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «LIT'Ye. Metallurgiya. 2016»* [Materials of International scientific-practical conference "Casting. Metallurgy. 2016"], Zaporozhye, May 24-26, 2016, pp 427- 428.
  10. Kazatchkov E.A., Makurov S.L. The enthalpy change of certain steels at high temperatures [Izmenenie ental'pii nekotorykh staley pri vysokikh temperaturakh], *Izv. vuzov. Chernaya metallurgiya* [Proceedings of the universities. Ferrous metallurgy.], 1978, no. 1, pp 67 – 69.
  11. Togobitskaia D.N., Hamhotko A.F., Prikhodko E.V. Methodological bases and technology of building the knowledge base of the properties of steel melts [Metodologicheskie osnovy i tekhnologiya sozdaniya bazy znaniy o svoystvakh metallurgicheskikh rasplavov], *Tezisy 4-go Rossiyskogo seminara «Komp'yuternoe modelirovanie rasplavov i stekol»* [Abstracts of the 4th Russian seminar "Computer simulation of melts and glasses."], Kurgan, 1998, pp 41- 42.

## РАЗРАБОТКА И АДАПТАЦИЯ МОДЕЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ В ПРОТЯЖНОЙ ПЕЧИ БАШЕННОГО ТИПА, УЧИТЫВАЮЩИХ НЕПОСТОЯНСТВО ВНЕШНИХ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ

<sup>1</sup>М.Ю. Рябчиков, <sup>2</sup>Е.С. Рябчикова, <sup>3</sup>А.П. Берестов, <sup>4</sup>А.У. Ахметова

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,  
г. Магнитогорск, Россия

<sup>1</sup>mr\_mgn@mail.ru

**Аннотация.** В работе рассмотрены проблемы идентификации ключевых теплотехнических характеристик протяжных печей, таких как внешние тепловые потери, а также тепловая емкость печи. Решение задачи идентификации осуществляется на базе обеспечения соответствия моделируемых режимов нагрева и охлаждения печи без металла экспериментальным данным. Решена задача идентификации и моделирования взаимного теплового влияния зон, которое является важным ограничивающим фактором при поиске рациональных режимов отжига полосы.

**Ключевые слова:** модель процессов в протяжной печи; идентификация теплотехнических характеристик зон печи; взаимное влияние зон в протяжной печи; рациональные режимы отжига полосы.

### Введение

Проблемы выбора температурных режимов обработки полосы в протяжных печах рассмотрены в работах многих авторов [1-7]. При выборе режимов используют различные критерии сравнительной оценки их эффективности и ограничения. Наибольшее внимание в работах уделяется поиску режимов обеспечения максимальной производительности печи, либо поиску режимов, обеспечивающих минимум затрат топлива при заданной производительности.

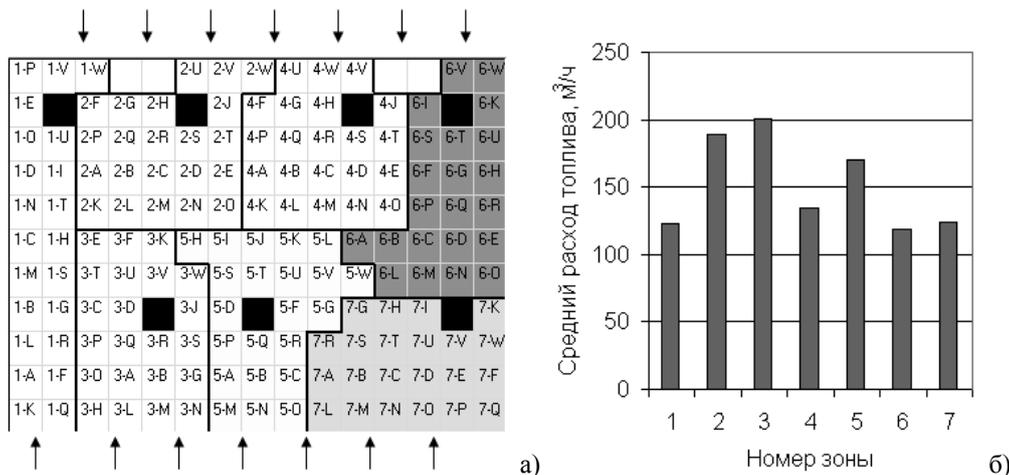
В современных нестабильных рыночных условиях, требующих гибкого управления производительностью, более предпочтительным является решение оптимизационной задачи во второй из указанных форм. Кроме того, для многих протяжных печей, входящих в состав металлургических агрегатов гибкое управление производительностью затруднено, вследствие необходимости сопряжения работы на множестве последовательных стадий процесса. Так для агрегата непрерывного горячего

оцинкования №1 ОАО «ММК», где максимальную долю сортамента (до 80 %) составляет полоса толщиной 0,00048 м, типовая скорость прохождения полосы через печь составляет 180 м/мин.

Система управления температурным режимом печи выполнена индивидуально для каждой из семи зон, на которые разделено рабочее пространство (рис. 1,а).

На рис. 1,б приведены усредненные за период один год работы значения расходов топлива по зонам печи. На уровень среднего расхода топлива на зону влияют различные факторы, основными из которых являются затраты тепла на нагрев металла, температурный уровень зоны, определяющий ее внешние тепловые потери, а также потери с отходящими газами после рекуперации их тепла.

В работе [6] изучены проблемы выбора температурного режима протяжной печи башенного типа для рассматриваемого агрегата и предложена математическая модель нагрева полосы, адаптированная по данным контроля температуры полосы на выходе печи. Однако,



**Рис. 1. а) Расположение зон в рабочем пространстве отделения нагрева (черным отмечены места установки зональных термомпар); б) Обычная схема распределения топлива по зонам для типового сортамента**

задача выбора рациональных режимов до сих пор в полной мере не решена, поскольку отсутствуют достоверные оценки коэффициента полезного действия печи в различных режимах, а имеющаяся информация характеризует только общие тенденции, связанные с эффективностью использования подводимого тепла в зонах печи.

### Идентификация и моделирование тепловых потерь зон протяжной печи

Идентификация тепловых потерь в зонах, не связанных с нагревом металла, представляет собой чрезвычайно сложную задачу по ряду причин.

Во-первых, даже несмотря на наличие приближенных адаптированных моделей нагрева полосы, затраты тепла на нагрев металла в отдельно взятой зоне сложно оценить вследствие отсутствия средств объективного контроля температуры полосы по мере ее продвижения в агрегате. Разработанные модели нагрева полосы адаптируются по результатам контроля ее температуры на выходе агрегата, что не гарантирует достоверного определения динамики изменения температуры в каждой отдельной зоне. Причиной подобного явления является отсутствие точных данных о динамике протекания процессов рекристаллизации стали.

Другой сложностью является протекание в печи переходных процессов по температуре рабочего пространства, связанных с решением задач управления температурным уровнем печи и действием возмущений по параметрам металла, проходящего через печь.

Несмотря на указанные сложности в работе печи, все же можно выделить периоды работы, когда задача идентификации уровня тепловых потерь каждой зоны может быть решена. Это периоды запуска печи в работу, в течение которых происходит нагрев рабочего пространства, а также периоды, когда агрегат останавливается для проведения ремонтных мероприятий и печь охлаждается. В указанные периоды через печь не движется металл.

За период работы агрегата в два года была собрана технологическая информация по девяти периодам запуска и останова агрегата, включающая в свой состав расходы топлива (природного газа) и воздуха на зоны, температуры рабочего пространства, а также температуры отходящих дымовых газов после рекуперации их тепла.

При решении задачи идентификации теплотехнических характеристик печи на базе имеющихся данных требуется решить задачу определения двух основных параметров для каждой зоны. Это тепловая емкость зоны и внешние тепловые потери.

Учитывая достаточно высокую стабильность удельной тепловой емкости огнеупоров в диапазоне температур до 800 °С ( $\approx \pm 10\%$ ), тепловую емкость искали в форме константы  $C_3$  индивидуально для каждой зоны.

Для минимизации числа неизвестных внешние тепловые потери каждой зоны представили в виде  $Q_{\text{ПЗ}} = a_3 \cdot t^k \cdot \Delta\tau$ , где  $t$  – температура рабочего пространства,  $\Delta\tau$  – интервал времени, а  $a_3$  и  $k$  – искомые коэффициенты.

Подбор коэффициентов  $C_3$  и  $a_3$  проводили путем сопоставления результатов моделирования нагрева и охлаждения рабочего пространства зон с экспериментальными данными на основе соотношений:

$$t_{\text{МЗ}}(\tau) = t_{\text{МЗ}}(\tau - \Delta\tau) + \frac{Q_{\text{ГЗ}} - Q_{\text{УГЗ}} - Q_{\text{ПЗ}}}{C_3}; \quad (1)$$

$$t_{\text{МЗ}}(0) = t_{\text{ЭЗ}}(0),$$

где  $Q_{\text{ГЗ}}, Q_{\text{УГЗ}}$  – тепло от сжигания природного газа, поданного в радиантные трубы зоны и тепло отходящих дымовых газов после рекуперации;  $t_{\text{ЭЗ}}$  – экспериментальные данные по температуре в зоне.

Попытки поиска значений  $C_3$  и  $a_3$  при выбранном значении  $k$  только по данным нагрева или охлаждения показали неоднозначность решения для каждой зоны. Однако, поиск с одновременным учетом ошибок по данным нагрева и охлаждения обеспечил такую однозначность. При этом, для получения адекватной модели обеспечили равнозначность ошибок по данным нагрева и охлаждения (охлаждение протекает примерно в пять раз дольше, чем нагрев).

Сопоставление ошибок моделирования при значениях  $k$  [0,5;1;1,5;2;3;4] показало, что наилучшие результаты по точности моделирования достигаются при  $k = 2$ , то есть зависимость тепловых потерь от температуры целесообразно представлять параболой.

На рис. 2 показан пример части серии экспериментальных данных и результатов моделирования для отдельной зоны для периодов нагрева и охлаждения (для периодов охлаждения дискретность данных понижена в пять раз). Видно, что даже на базе достаточно простой модели (1) удалось добиться достаточно высокой точности описания тепловых процессов.

На рис. 3,а-б показаны результаты по определению тепловой емкости зон печи и зависимости внешних тепловых потерь от температуры.

Из рис. 3 следует, что внешние тепловые потери зон существенно различны. Наибольшие потери характерны для верхних зон 3,5,7, а также для зоны 6.

Возможной причиной неадекватности полученных результатов может являться тепловой обмен между зонами, который не учитывается моделью (1).

Для доказательства обратного рассчитали коэффициент корреляции между средними по экспериментальным данным перепадам температур  $t_{\text{ЭЗ}} - t_{\text{ОПЗ}}$  и коэффициентам  $a_3$ , где  $t_{\text{ОПЗ}}$  – средняя температура в областях контакта зоны с другими зонами.

Для перехода к полю температур в рабочем пространстве от температур в отдельных точках контроля использовали способ, предложенный в [6]. Полученный коэффициент корреляции составил  $R = -0,89$ .

Это означает, что областям более низких температур соответствуют более высокие уровни внешних тепловых потерь. Таким образом, наличие неучтенного теплообмена между зонами может только увеличить неравномерность между найденными уровнями внешних тепловых потерь.

В целом, по экспериментальным данным величины  $t_{\text{ЭЗ}} - t_{\text{ОПЗ}}$  относительно невелики и особенности распределения их значений по рассматриваемым экспериментальным данным не позволяют учесть в статистической модели теплообмен между зонами.

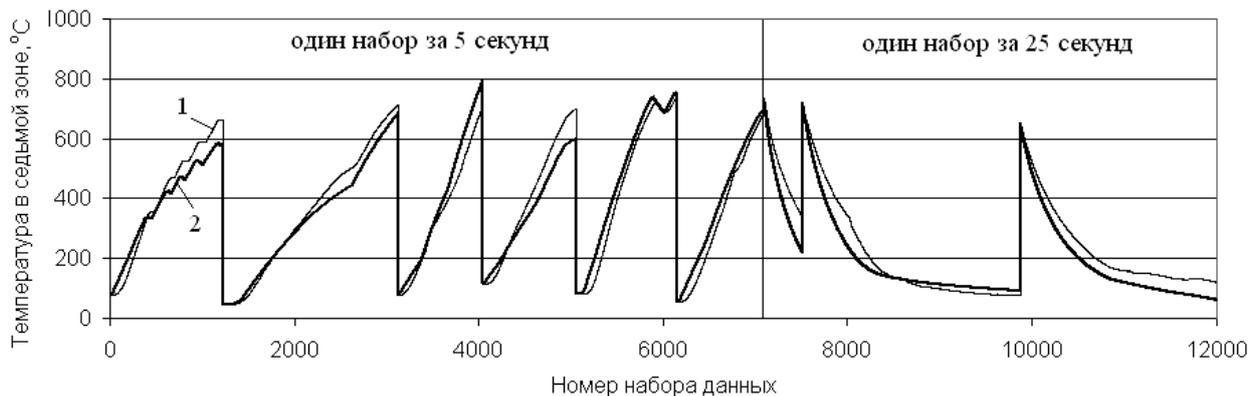


Рис. 2. Пример результатов моделирования температуры рабочего пространства и части экспериментальных данных для седьмой зоны

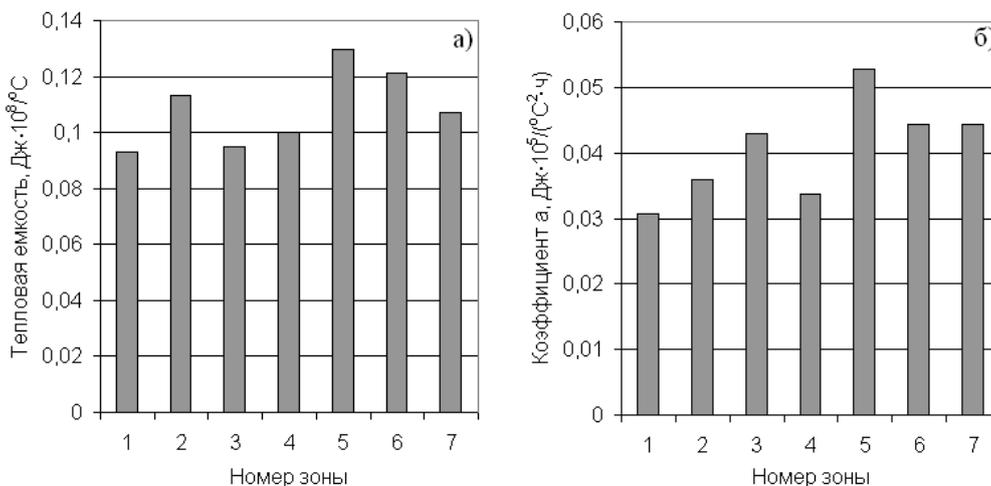


Рис. 3. Результаты определения  $C_3$  и  $\alpha$ , для зон печи: а) тепловая емкость  $C_3$ ; б) коэффициент  $\alpha$ , характеризующий внешние тепловые потери зоны

Однако, параметры теплообмена между зонами являются важными ограничивающими факторами при поиске рациональных режимов отжига полосы, так как они ограничивают возможные перепады температур между зонами. Для решения оптимизационных задач необходимы приближенные оценки данных параметров.

#### Идентификация и моделирование теплового взаимодействия между зонами

Для идентификации параметров теплового взаимодействия между зонами использовали данные об обычных рабочих режимах печи с управлением расходом топлива в ручном режиме (от оператора). Такие режимы относительно редки для агрегата, но за период два года в базе было найдено порядка сорока периодов работы, в течение которых параметры полосы, расходы топлива и воздуха по всем зонам, кроме одной, были стабильны. При этом в одной из зон оператор однократно скачкообразно изменял расход топлива. Пример подобной динамики изменения расходов топлива на зоны приведен на рис. 4,а. Видно, что в определенный момент времени оператор изменил расход на шестую зону, что повлекло за собой изменение температур в прилегающих четвертой и шестой зонах по отношению к прогнозируемой динамике их изменения. Прогноз выполнен на базе инерционного звена первого порядка.

Динамику изменения температуры в отдельной зоне после возмущения можно представить упрощенной моделью:

$$t(\tau) = t(\tau_0) + \frac{1}{C_3} \int_{\tau_0}^{\tau} (q_r - q_n - q_{yT} + q_m - q_n) d\tau, \quad (2)$$

где  $q_m$  - тепловой поток, связанный с межзонным теплообменом;  $q_n$  - тепловой поток, связанный с нагревом полосы;  $\tau_0$  - момент времени изменения расхода топлива.

Применяя выражение (2) для условий четвертой зоны, которая расположена ранее зон шесть и семь по ходу движения полосы, можно принять допущение о постоянстве величины  $q_{\Sigma} = q_r - q_n - q_{yT} - q_n = const$ . Тогда, предполагая, что тепловой поток между зонами пропорционален перепаду температур, можем записать:

$$t_4(\tau) = t(\tau_0) + \frac{\lambda_{6,4}}{C_3} \int_{\tau_0}^{\tau} (t_6(\tau) - t_4(\tau)) d\tau + \frac{\tau - \tau_0}{C_3} q_{\Sigma}, \quad (3)$$

где  $\lambda_m$  - искомый параметр, характеризующий теплообмен между зонами;  $Q_{\Sigma}$  - теплопередача, связанная с наличием теплового потока  $q_{\Sigma} = q_r - q_n - q_{yT} - q_n$ .

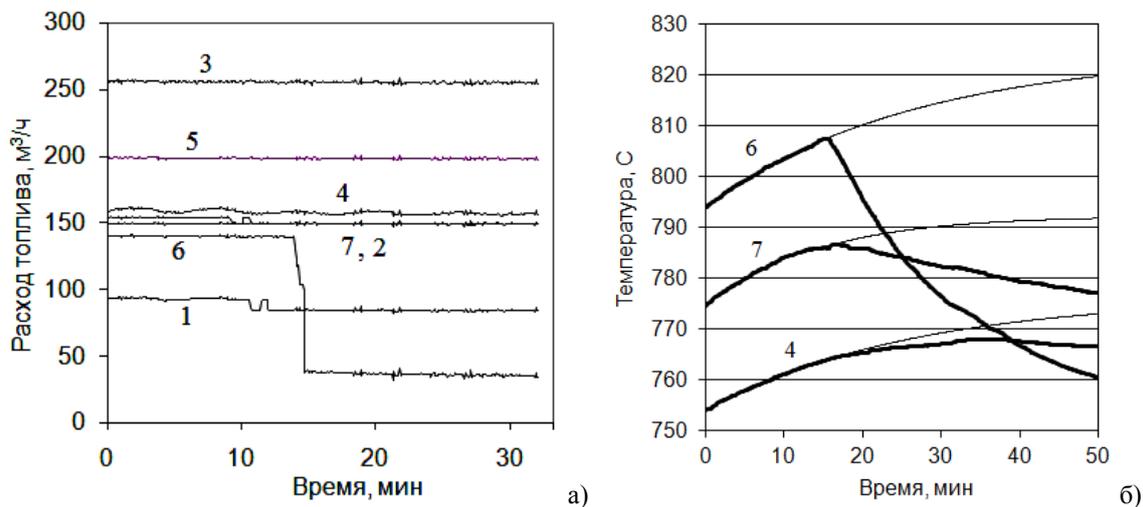


Рис. 4. Пример изменения расходов топлива на зоны (а) и соответствующего изменения температур в шестой зоне и примыкающих к ней четвертой и седьмой зонах (тонкой линией показан прогноз)

Выражение (3) содержит две неизвестные  $\lambda_{6,4}$  и  $q_{\Sigma}$ . Для определения  $\lambda_{6,4}$  рассмотрим систему из двух выражений (3) для фактического и прогнозируемого (по данным до возмущения) изменения температуры (рис. 4,б), из которой получим:

$$t_{4п}(\tau) - t_{4ф}(\tau) = \frac{\lambda_{6,4}}{C_3} \left( \int_{\tau_0}^{\tau} (t_{6п}(\tau) - t_{4п}(\tau)) d\tau - \int_{\tau_0}^{\tau} (t_{6ф}(\tau) - t_{4ф}(\tau)) d\tau \right) \quad (4)$$

где индексы “п” и “ф” означают прогнозируемое и фактическое значение.

Далее аппроксимируем динамику изменений температур  $t_{6п}, t_{4п}, t_{6ф}, t_{4ф}$  квадратичными зависимостями от времени  $at^2 + bt + c$ . Тогда  $\lambda_{6,4}$  может быть определено из выражения (5):

$$\lambda_{6,4}(\tau) = \frac{C_3(t_{4п}(\tau) - t_{4ф}(\tau))}{\frac{\tau^3}{3}(a_{6п} - a_{7п} - a_{6ф} + a_{7ф}) + \frac{\tau^2}{3}(b_{6п} - b_{7п} -$$

$$- b_{6ф} + b_{7ф}) + \tau(c_{6п} - c_{7п} - c_{6ф} + c_{7ф})}. \quad (5)$$

Для коэффициента  $\lambda_{6,7}$ , характеризующего теплообмен между зонами шесть и семь, дополнительно нужно учитывать непостоянство теплового потока на полосу  $q_{п}$ . Для его расчета использовали адаптированную модель нагрева полосы, предложенную в [6].

Полученные зависимости  $\lambda_{6,4}$  и  $\lambda_{6,7}$  от времени (рис. 5) показывают достаточно высокую степень постоянства этих коэффициентов, что позволяет использовать их усредненные по времени значения в теплотехнических расчетах.

Средние значения  $\lambda_{6,4}$  и  $\lambda_{6,7}$  составляют 36 и 250 кДж/(°С·мин). Полученные результаты показывают наличие интенсивного теплообмена между зонами по вертикали, и относительно слабый теплообмен между зонами по длине печи.

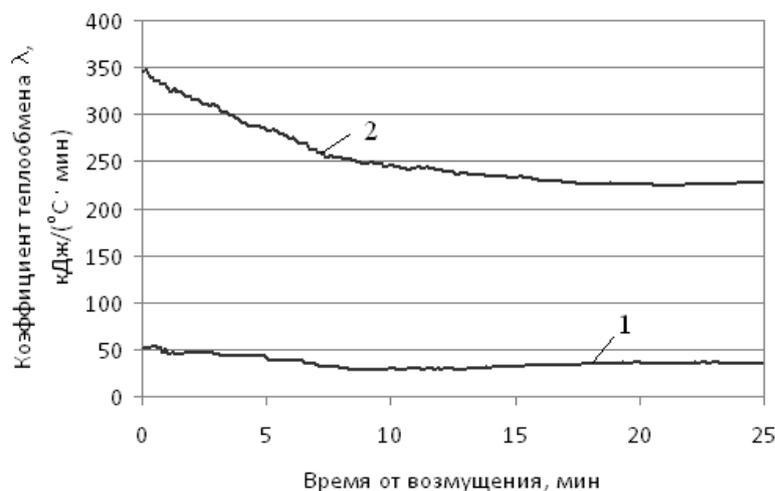


Рис. 5. Найденные зависимости  $\lambda_{6,4}$  (1) и  $\lambda_{6,7}$  (2) от времени

## Заключение

Созданные модели позволяют решать задачи поиска и реализации наилучшего в соответствии с выбранным критерием (например, минимизации затрат топлива) температурного режима работы протяжной печи.

Адаптированная модель позволяет оценить время, необходимое для корректировки температурного режима в зонах при переходе на новые параметры полосы при известных максимально допустимых расходах топлива и воздуха на отдельную зону. Решение этой задачи позволяет минимизировать затраты топлива на нагрев с предотвращением ситуаций, связанных с получением дефектной продукции [8-10], когда вследствие изменения сортамента производительности горелок оказывается недостаточно для своевременного перевода температур в зонах на новые требуемые по технологии уровни.

Полученные результаты доказывают целесообразность внедрения систем автоматизированного анализа технологической информации [11], необходимой для адаптации моделей, которые могут быть полезны при выборе режимов работы металлургических агрегатов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Panferov V.I. Economical control of metal heating in continuous furnaces // *Steel in Translation*. 2007. Т. 37. № 10. С. 847-850.
2. Parsukin B.N., Andreev S.M., Logunova O.S., Akhmetov T.U. Energy-saving optimal control over heating of continuous cast billets // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015. Т. 79. № 9-12. С. 1797-1803.
3. Panferov V.I. Economical control of metal heating in continuous furnaces // *Steel in Translation*. 2007. Т. 37. № 10. С. 847-850.
4. Рябчиков М.Ю., Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Головкин Н.А. Использование модели нагрева полосы при управлении температурным режимом в протяжной печи башенного типа // *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*. 2011. № 5. С. 41-50.
5. Самарина И.Г., Мухина Е.Ю., Андреев С.М. Разработка структуры нейросетевой математической модели процесса отжига полосы в протяжной печи // *Автоматизированные технологии и производства*. 2015. № 2 (8). С. 9-13.
6. Рябчиков М.Ю., Самарина И.Г. Изучение режимов нагрева стальной полосы в протяжной печи башенного типа для светлого отжига // *Металлообработка*. 2013. № 1 (73). С. 43-49.
7. Рябчиков М.Ю., Рахманов С.Н., Беляков А.А. Статистические модели нагрева полосы в протяжной печи башенного типа агрегата непрерывного горячего оцинкования // *Автоматизированные технологии и производства*. 2012. № 4. С. 81-97.
8. Самарина И.Г., Каюмова В.Э. Обзор приборов магнитной структуроскопии стали в прокатном производстве // *Автоматизированные технологии и производства*. 2015. № 3 (9). С. 46-49.
9. Самарина И.Г. Анализ причин появления дефектной продукции на агрегате непрерывного горячего цинкования // *Автоматизированные технологии и производства*. 2014. № 6. С. 105-109.
10. Самарина И.Г., Каюмова В.Э. Обзор систем регулирования и измерения толщины цинкового покрытия // *Автоматизированные технологии и производства*. 2016. № 2 (12). С. 28-33.
11. Рябчиков М.Ю., Рябчикова Е.С., Сунаргулова А.И. Сэмплинг технологической информации при управлении металлургическими процессами // *Автоматизированные технологии и производства*. 2016. № 2 (12). С. 34-40.

## DEVELOPMENT AND MAPPING OF OPERATING TEMPERATURE MODELS IN TOWER-TYPE ANNEALING FURNACE WHICH CONSIDER VARIABILITY OF EXTERNAL HEAT LOSSES

M.Y. Ryabchikov, E.S. Ryabchikova, A.P. Berestov, A.U. Ahmetova  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

**Abstract.** We consider issues of identification of key heat characteristics of annealing furnaces such as heat losses as well as furnace thermal storage. We address the identification challenge by means of mapping of simulated heating and cooling cycles in the furnace without metal onto experimental data. We handle the problem of identification and simulation of mutual interference of the thermal zones. This interference is a significant limiting factor in the search for rational strip annealing conditions.

**Keywords:** process models in annealing furnace, identification of heat characteristics of furnace zones, mutual interference of zones in annealing furnace, rational strip annealing conditions.

## REFERENCES

1. Panferov V.I. Economical control of metal heating in continuous furnaces // *Steel in Translation*. 2007. Т. 37. № 10. С. 847-850.
2. Parsukin B.N., Andreev S.M., Logunova O.S., Akhmetov T.U. Energy-saving optimal control over heating of continuous cast billets // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015. Т. 79. № 9-12. С. 1797-1803.
3. Panferov V.I. Economical control of metal heating in continuous furnaces // *Steel in Translation*. 2007. Т. 37. № 10. С. 847-850.
4. Ryabchikov M.Yu., Parsukin B.N., Andreev S.M., Golovko N.A. Use of heating of a band model for temperat

- 
6. ure mode control in the tower type lingering furnace [Ispolzovanie modeli nagreva polosy pri upravlenii temperaturnym rezhimom v protyazhnoy pechi bashennogo tipa], *Neyrokompyutery: razrabotka, primeneniye [Neurocomputers: development, application]*, 2011, no. 5, pp. 41-50.
  7. Samarina I.G., Mukhina E.Yu., Andreev S.M. The development of structural neural network mathematical model of the process of annealing strip in lingering furnace [Razrabotka struktury neyrosetevoy matematicheskoy modeli protsessa otzhiga polosy v protyazhnoy pechi], *Avtomatizirovannyye tehnologii i proizvodstva [The automated technologies and productions]*, 2015, no. 2, pp. 9-13.
  8. Ryabchikov M.Yu., Samarina I.G. Studying of strip heating dynamics in the lingering tower type furnace [Izuchenie rezhimov nagreva stalnoy polosy v protyazhnoy pechi bashennogo tipa dlya svetlogo otzhiga], *Metalloobrabotka [Metal working]*, 2013, no. 1 (73), pp. 43-49.
  9. Ryabchikov M.Yu., Rahmanov S.N., Belyakov A.A. Statistical models of heating of a strip in the lingering furnace of tower type of the unit of continuous hot galvanizing [Statisticheskie modeli nagreva polosy v protyazhnoy pechi bashennogo tipa agregata nepreryvnogo goryachego ocinkovaniya], *Avtomatizirovannyye tehnologii i proizvodstva [The automated technologies and productions]*, 2012, no. 4, pp. 81-97.
  10. Samarina I.G., Kayumova V.E. Instrument overview structurescopy magnetic steel rolling industry [Obzor priborov magnitnoy strukturoskopii stali v prokatnom proizvodstve], *Avtomatizirovannyye tehnologii i proizvodstva [The automated technologies and productions]*, 2015, no. 3, pp. 46-49.
  11. Samarina I.G. Analysis of the defective products occurrence reasons at the continuous hot-dip galvanizing unit [Analiz prichin poyavleniya defektnoy produktsii na agregate nepreryvnogo goryachego tsinkovaniya], *Avtomatizirovannyye tehnologii i proizvodstva [The automated technologies and productions]*, 2014, no. 6, pp. 105-109.
  12. Samarina I.G., Kayumova V.E. Overview of control systems and measuring the thickness of the zinc coating [Obzor sistem regulirovaniya i izmereniya tolschchiny tsinkovogo pokrytiya], *Avtomatizirovannyye tehnologii i proizvodstva [The automated technologies and productions]*, 2016, no. 2(12), pp. 28-33.
  13. Ryabchikov M.Yu., Ryabchikova E.S., Sunargulova A.I. Sampling in technical data acquisition tasks [Semplinye tekhnologicheskoy informatsii pri upravlenii metallurgicheskimi protsessami], *Avtomatizirovannyye tehnologii i proizvodstva [The automated technologies and productions]*, 2016, no. 2(12), pp. 34-40.



